

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Huklek

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Marko Huklek

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu, asistentu dr.sc. Matiji Bušiću i djelatnicima Laboratorija za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na pomoći tijekom izrade ovoga rada.

Marko Huklek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
protektivno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Marko Huklek

Mat. br.: 0035182758

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Analiza zavarljivosti legure Inconel 625

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Weldability Analysis of Inconel 625

Opis zadatka:

Definirati pojam zavarljivosti primjenom modernog pristupa te odrediti karakteristične metode ispitivanja uzimajući u obzir različite kriterije. Posebno analizirati zavarljivost legura nikla te izdvojiti specifične probleme i pristup tehnologiji zavarivanja. Odrediti područje primjene legure Inconel 625 te opisati specifične tehnologije zavarivanja i područja operativnih parametara.

U eksperimentalnom dijelu za dodatni materijal Inconel 625 osmisli plan eksperimenta za određivanje kritičnih vrijednosti parametara sa stanovišta nastanka toplih pukotina. Primjenom metode Vrestraint ocijeni mogućnost nastanka za različite razine unosa topline i stupnja miješanja. Zaključno kvantificirati kritično područje parametara i područja miješanja te dati preporuke za primjenu u praksi.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadani zadan:

11. svibnja 2017.

Zadani zadan:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:

13. srpnja 2017.

Predviđeni datum obrane:

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA	V
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. ZAVARLJIVOST.....	2
2.1. Pojam zavarljivosti.....	2
2.1.1. Utjecaj unosa topline.....	5
2.1.2. Utjecaj tehnike i redosljeda zavarivanja	6
2.2. Ispitivanje zavarljivosti	7
3. NIKAL I LEGURE NIKLA	10
3.1. Zavarljivost legura nikla	11
3.1.1. Utjecaj glavnih legirnih elemenata	12
3.1.1.1. Bakar	13
3.1.1.2. Krom	13
3.1.1.3. Željezo.....	13
3.1.1.4. Molibden.....	13
3.1.1.5. Kobalt.....	13
3.1.2. Manje zastupljeni legirni elementi.....	14
3.1.2.1. Ugljik	14
3.1.2.2. Magnezij	15
3.1.2.3. Silicij.....	15
3.1.2.4. Niobij	15
3.1.2.5. Mangan	15
3.1.2.6. Titan i aluminij.....	16
3.1.2.7. Bor i cirkonij.....	16
3.1.3. Utjecaj nečistoća	16
3.1.3.1. Tople pukotine	17
3.1.4. Utjecaj plinova	18
3.2. Tehnologije zavarivanja nikla i legura nikla.....	18
4. PODRUČJE PRIMJENE LEGURE INCONEL 625.....	21
4.1. Mikrostruktura	23
5. SPECIFIČNE TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA LEGURE INCONEL 625	24
5.1. MIG/MAG postupak zavarivanja.....	24
5.1.1. Metode prijenosa metala	25
5.1.1.1. Prijenos metala u području kratkih spojeva	25
5.1.1.2. Prijenos metala prijelaznim lukom	27

5.1.1.3.	Prijenos metala štrcajućim lukom.....	28
5.1.1.4.	Prijenos metala impulsnim strujama.....	29
5.1.2.	Utjecaj parametara kod MIG/MAG postupka zavarivanja	29
5.1.2.1.	Zaštitni plinovi	31
5.1.3.	Prednosti i nedostaci MIG/MAG postupka.....	33
5.1.4.	Zavarivanje inconela 625 MIG/MAG postupkom.....	34
5.1.4.1.	Utjecaj zaštitnih plinova na navarivanje Inconela 625 MIG/MAG postupkom.....	34
6.	EKSPERIMENTALNI DIO	38
6.1.	Osnovni materijal.....	38
6.2.	Dodatni materijal.....	39
6.3.	Oprema za zavarivanje.....	40
6.3.1.	Izvor struje	40
6.3.2.	Sustav za automatizirano vođenje gorionika	41
6.4.	Varestraint metoda	42
6.4.1.	Provedba ispitivanja.....	43
6.4.2.	Rezultati testa.....	44
6.5.	Opis postupka analize zavarljivosti.....	44
6.6.	Dobiveni rezultati.....	50
6.6.1.	Slučaj A (mješavina plinova Ar 97,5% i CO ₂ 2,5%).....	50
6.6.2.	Slučaj B.....	51
6.6.3.	Kemijski sastav zavara.....	52
6.7.	Makro izbrusci i geometrija zavara.....	55
7.	ZAKLJUČAK.....	62
	LITERATURA.....	63
	PRILOZI.....	65

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz zavarljivosti [3]	2
Slika 2.	„Backstep“ redosljed zavarivanja [6]	7
Slika 3.	Komad rude nikla [8]	10
Slika 4.	Vruća pukotina [8]	12
Slika 5.	Odnos širine i dubine zavara [10]	18
Slika 6.	Navarivanje Inconela 625 [12]	21
Slika 7.	Shematski prikaz MIG/MAG postupka zavarivanja [16]	25
Slika 8.	„Pinch efekt“ [15]	26
Slika 9.	Postupak odvajanja kapljice [15]	27
Slika 10.	Shematski prikaz prijelaznog luka [15]	28
Slika 11.	Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [15]	28
Slika 12.	Slobodni kraj žice (L) i udaljenost sapnice od radnog komada (B) [17]	30
Slika 13.	Ovisnost toplinske vodljivosti plinova o temperaturi [18]	32
Slika 14.	Navaren sloj Inconela 625 u zaštiti plina Argona [20]	35
Slika 15.	Navaren sloj Inconela 625 u zaštiti mješavine plinova 15% CO ₂ i Ar [20]	36
Slika 16.	Navaren sloj Inconela 625 u zaštiti mješavine plinova 15 % CO ₂ i Ar korištenjem impulsnog luka [20]	36
Slika 17.	Navaren sloj Inconela 625 u zaštiti mješavine plinova 79%Ar/20%He/1%O ₂ korištenjem impulsnog luka [20]	37
Slika 18.	Izvor struje za zavarivanje	41
Slika 19.	„Bugo“ sustav za automatizaciju MIG/MAG zavarivanja	42
Slika 20.	Mješavina zaštitnog plina Ar 75,5 % i CO ₂ 2,5 %	44
Slika 21.	Postavljanje uzorka u steznu napravu	46
Slika 22.	Uređaj za Varestraint	47
Slika 23.	Uzorci slučaja A nakon ispitivanja	50
Slika 24.	Uzorci slučaja A bez vidljivih pukotina	51
Slika 25.	Uzorci slučaja B nakon ispitivanja	51
Slika 26.	Uzorci nakon uklanjanja oksida	52
Slika 27.	XRF uređaj za ispitivanje kemijskog sastava materijala	54
Slika 28.	Izrezivanje uzoraka	55
Slika 29.	Izbrušeni uzorci	55
Slika 30.	Uzorak 1A	56
Slika 31.	Uzorak 2A	57
Slika 32.	Uzorak 3A	57
Slika 33.	Uzorak 4A	58
Slika 34.	Uzorak 5A	58
Slika 35.	Uzorak 1B	59
Slika 36.	Uzorak 2B	60
Slika 37.	Uzorak 3B	60
Slika 38.	Uzorak 4B	61
Slika 39.	Uzorak 5B	61

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Kemijski sastav legure Inconel 625 [13].....	23
Tablica 2.	Kemijski sastav čelika S355J2 prema HRN EN 10028-2:2004. [24]	39
Tablica 3.	Kemijski sastav dodatnog materijala.....	39
Tablica 4.	Mehanička svojstva dodatnog materijala	40
Tablica 5.	Karakteristike izvora struje za zavarivanje	40
Tablica 6.	Način obrađivanja rezultata ispitivanja	43
Tablica 7.	Vrijednosti parametara ispitnih uzoraka slučaja A.....	48
Tablica 8.	Vrijednosti parametara ispitnih uzoraka slučaja B.....	49
Tablica 9.	Kemijski sastav ispitnih uzoraka	53

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
Al	Aluminij
Ar	Argon
B	Bor
C	Ugljik
CO ₂	Ugljikov dioksid
Co	Kobalt
Cl	Klor
Cr	Krom
CT	Compact Tension
CTS	Controlled Thermal Severity
Cu	Bakar
DC	Direct Curent
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod praškom
FCC	Face Centered Cubic
Fe	Željezo
H ₂	Vodik
He	Helij
HRN	Hrvatska norma
ISO	International Organization for standardization
Max	Maksimum
Mg	Magnezij
MIG/MAG	Metal Inert Gas/Metal Active Gas
Min	Minimum
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N ₂	Dušik
Nb	Niobij
Ni	Nikal
O ₂	Kisik

P	Fosfor
Pb	Olovo
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
RRC	Rigid Restaint Cracking
S	Sumpor
Si	Silicij
Ta	Tantal
Ti	Titan
TIG	Tungsten Inert Gas
TRC	Tensile Restain Cracking
TTT	Time Temperature Transformation
Zr	Cirkonij
ZUT	Zona utjecaja topline
XRF	X-ray fluorescence

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
B	mm	Udaljenost gorionika od radnog komada
d	mm	Debljina dodatnog materijala
HV	-	Tvrdoća prema Vickersu
I	A	Jakost struje zavarivanja
J	J	Udarni rad loma
k	-	stupanj iskoristivosti pojedinog postupka
l	mm	Duljina slobodnog kraja žice
Re	N/mm ²	Granica razvlačenja
RM	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Konvencionalna granica razvlačenja
T_t	°C	Temperatura
U	V	Napon
V	l/min	Protok plina
v	mm/s	Brzina stapa cilindra
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
Q	kJ/mm	Unesena toplina
φ	mm	Promjer žice

SAŽETAK

Cilj ovog rada je analiza zavarljivosti legure Inconel 625. Rad se sastoji od teoretskog i eksperimentalnog dijela. U teoretskom dijelu definiran je pojam zavarljivosti primjenom modernog pristupa, te su određene karakteristične metode ispitivanja s obzirom na različite kriterije. Detaljno je analizirana zavarljivost legure nikla te su izdvojeni specifični problemi i pristup tehnologiji zavarivanja. Određeno je područje primjene legure Inconel 625 te su opisane specifične tehnologije zavarivanja i područje operativnih parametara.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je ispitivanje legure Inconel 625 na sklonost nastajanju toplih pukotina Varestraint metodom. Analiza je provedena navarivanjem Inconela 625 MIG/MAG postupkom na deset uzoraka od općeg konstrukcijskog čelik S355 u dva slučaja. U prvom slučaju (A) korištena je mješavina zaštitnih plinova Ar 97,5 % i CO₂ 2,5 %. U drugom slučaju (B) korišten je zaštitni plin Ar uz iste parametre struje, napona, brzine zavarivanja i protoka plina. Nakon provedbe testa izvršena je kemijska analiza i izmjera geometrije zavara kako bi se utvrdio stupanj miješanja i kritično područje parametara. Zaključno su dane preporuke za primjenu u praksi.

Ključne riječi: Inconel 625, tople pukotine, zavarljivost.

SUMMARY

Aid of this paper is Weldability Analysis of Inconel 625. The work consists of a theoretical and experimental part. In theoretical part the term of weldability using the modern approach is defined and as well as characteristic test methods due to different criteria. Weldability of nickel alloy is detally analized and then specific problems and access to welding technology pointed out. The application area of Inconel 625 alloy is determined and then specific welding techniques and the operating parameters area are described.

In experimental part, Inconel 625 alloy testing is performed in the formation of hot cracks by Varestraint method. The analysis is carried out by MIG/MAG overlaying of the Inconel 625 in two cases on ten samples of the structural steel S355. In the first case (A) mixture of protective gases Ar 97.5 % and CO₂ 2.5 % are used. In the second case (B), the protective gas Ar is used, with the same parameters of current, voltage, welding speed and gas flow as in the first case. After the test is carried out, a chemical analysis and geometry measurements are performed in order to determine the mixing degree and parametars criteria. In the end, recommendations for practical application are given.

Key words: hot cracking, Inconel 625, weladability.

1. UVOD

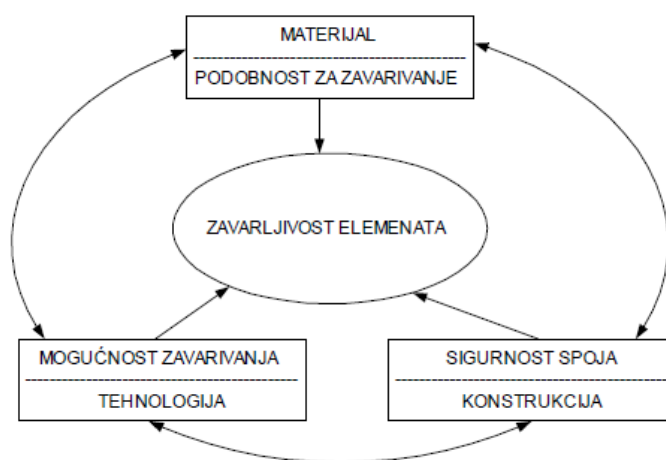
Razvoj legure Inconel 625 započeo je 1950-ih kako bi se zadovoljili zahtjevi parnih postrojenja za visoko čvrstim materijalima. Nakon nekoliko godina istraživanja utjecaja raznih elemenata na svojstva i obradivost legura, kao rezultat 1962 nastala je legura Inconel 625. Legura se u današnje vrijeme ponajviše koristi zbog visoke čvrstoće, obradivosti (uključujući spajanje zavarivanjem) te otpornošću na koroziju. Radna temperatura legure može iznositi i do 982 °C. Visoka čvrstoća legure posljedica je kombinacije legirnih elemenata molibdena i niobija s bazom nikla i kroma. Takva kombinacija legirnih elemenata ujedno je zaslužna za korozijsku postojanost (rupičasta korozija, napetosnu koroziju, otpornost na ione klorida) i visoku temperaturnu oksidaciju. Legura kao takva odličan je izbor za uporabu u morskom okruženju, izradu izmjenjivača topline, naftnoj i petrokemijskoj industriji, nuklearnim reaktorima [1, 2].

Zbog visoke legiranosti kao materijal vrlo je skupa te se sve više koristi kao dodatni materijal za navarivanje u raznim postupcima. Jedan od postupaka zavarivanja (navarivanja) je i MIG/MAG (engl. Metal Inert/Active Gas) postupak. MIG/MAG postupak zbog svojih prednosti kao što su mogućnost automatizacije navarivanja, velik depozit u odnosu na TIG (engl. Tungsten Inert Gas) postupak ili plazma postupak zavarivanja zauzima veliku prednost u vidu proizvodnosti i brzine zavarivanja.

2. ZAVARLJIVOST

2.1. Pojam zavarljivosti

Zavarljivost po definiciji je: svojstvo materijala da se pri određenim parametrima zavarivanja ostvari kontinuirani homogeni spoj koji će svojstvima udovoljiti predviđenim uvjetima i vijeku eksploatacije (slika 1).



Slika 1. Shematski prikaz zavarljivosti [3]

Zavarljivost je komparativno svojstvo (uspoređuje se zavarljivost dva ili više materijala uz primjenu iste ili različitih tehnologija zavarivanja). Ocjena je najčešće kvalitativna (zadovoljavajuća / ne zadovoljavajuća) ili kvantitativna (kada postoji dovoljan broj eksperimentalno dobivenih podataka o svojstvima zavarenih spojeva i svojstvima osnovnog materijala s obzirom na dominantni otkaz/otkaze zavarenih spojeva). Dominantnim otkaz - onaj otkaz kojemu pripada najveća vjerojatnost pojavljivanja u eksploataciji [4].

Zavarljivost je ovisna o tri faktora [3]:

- Svojstva materijala-metalurška zavarljivost
- Svojstva oblikovanja (konstrukcije)-konstrukcijska zavarljivost
- Svojstva izrade (tehnologije)-operativna zavarljivost
- Međusobna interakcija svih faktora

Svojstva materijala i metalurške značajke ovisni su o načinu proizvodnje materijala tj. način proizvodnje materijala i dezoksidacije, toplinska obrada, način deformacije (topla/hladna) kritične su za:

- Segregacije
- Uključke
- Anizotropnost
- Veličinu zrna
- Kristalizaciju

Svojstva materijala-fizičke značajke:

- Koeficijent toplinske dilatacije
- Toplinska vodljivost
- Temperatura taljenja
- Čvrstoća i žilavost

Svojstva oblikovanja-oblik konstrukcije

- Raspored sila u konstrukciji
- Izvedba zavora
- Debljina materijala
- Utjecaj zareznog djelovanja
- Razlike u krutosti

Svojstva oblikovanja-uvjeti opterećenja

- Vrsta i intenzitet naprezanja u konstrukciji
- Dimenzionalni raspon naprezanja
- Brzina opterećenja
- Radne temperature
- Korozijska

Svojstva izrade-operativna zavarljivost:

- Priprema spoja- vrsta spoja, oblik spoja
- Procedura zavarivanja-postupak zavarivanja, vrsta i oblik dodatnih materijala, parametri zavarivanja, redoslijed zavarivanja, predgrijavanja, položaj zavarivanja, aktivnosti za smanjenje utjecaja negativnih vremenskih prilika
- Obrada nakon zavarivanja-toplinska obrada, mehanička obrada (brušenje, strojna obrada, sačmarenje, čekićanje), kemijska obrada (visokolegirani nehrđajući čelici)

Postoje tri osnovne razine na kojima se razmatra zavarljivost [4]:

- Operativna zavarljivost
- Metalurška ili lokalna zavarljivost
- Konstrukcijska ili opća zavarljivost

Pod pojmom operativne zavarljivosti istražuje se ponašanje materijala prilikom taljenja, te mogućnosti dobivanja kvalitetnog zavarenog spoja s ili bez primjene operativnih vještina (predgrijavanje, oblaganje ivica žlijeba za zavarivanje, dogrijavanje).

Istraživanjem metalurške ili lokalne zavarljivosti promatra se utjecaj unošenja topline na transformacije osnovnog materijala i materijala zavarenog spoja.

Istraživanju konstrukcijske ili opće zavarljivosti cilj je istraživanje ponašanja zavarenog spoja na zavarenoj konstrukciji (lokacija zavarenog spoja i utjecaj zareznog djelovanja, konstrukcijsko oblikovanje, mogućnost zavarivanja – pristupačnost).

Prvi je pristup kod istraživanja zavarljivosti nekog materijala pretraživanje dostupnih baza podataka (arhiva tehnologija zavarivanja tvornice, različiti znanstveno-stručni časopisi, zbornici znanstveno stručnih savjetovanja, knjige, internet). Poželjno je korištenje različitih eksperimentalno-iskustvenih formula (koje vrijede uz određena ograničenja: određeni materijali, određene vrijednosti sadržaja kemijskih elemenata, određene debljine i mehanička svojstva, stanje isporuke, Na ovaj se način može približno procijeniti koje se poteškoće mogu očekivati pri zavarivanju, imajući u vidu i poznate uvjete eksploatacije zavarenih spojeva, te zahtjeve za kvalitetu.

Drugi je korak provođenje različitih eksperimentalnih ispitivanja koja prethode verifikaciji postupka zavarivanja. Budući da se zavarivanjem spaja veliki broj istorodnih, ali i raznorodnih materijala, pristupi ispitivanju zavarljivosti imaju određenih sistematskih sličnosti, ali i praktičnih različitosti. Tako se zavarljivost materijala (istorodnih i raznorodnih) detaljnije obrazlaže posebno za svaku grupu materijala [4].

2.1.1. Utjecaj unosa topline

Količina unošene topline uključujući predgrijavanje i postupak zavarivanja reguliraju brzinu hlađenja taline zavara i zonu utjecaja topline (ZUT). Prilikom zavarivanja visoko tvrdih metala sporo hlađenje zavara pogoduje smanjenju pojave pukotina u zoni utjecaja topline. Kod većini metala s plošno centriranom kubnom rešetkom sporo hlađenje nije pogodno. Pogrubljenjem zrna materijala smanjuje se površina granica zrna u odnosu na volumen zrna. Kod metala koji precipitacijski očvršćuju sporim hlađenjem nastaje šire područje zone utjecaja topline. Visokim unosom topline i sporim hlađenjem povećava stopa miješanja dodatnog i osnovnog materijala što može imati štetan utjecaj na zavareni spoj. Predgrijavanjem ostvaruje se sporo hlađenje što je pogodno kod zavarivanja ugljičnog ili

niskolegiranog čelika jer se smanjuje čvrstoća u zoni utjecaja topline. Manja koncentracija naprezanja omogućuje veću difuziju vodika van metala zavara te smanjuje zonu martenzita.

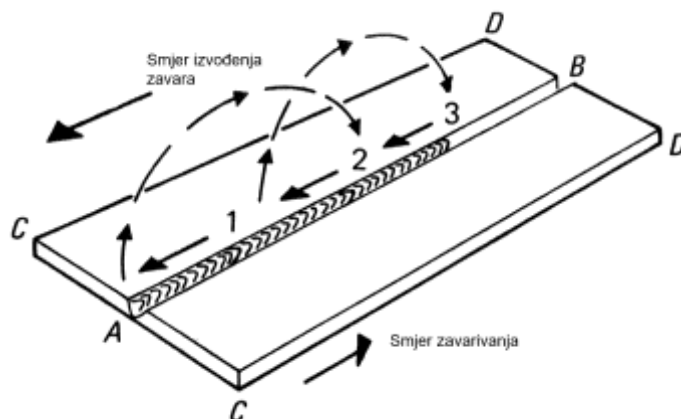
Količina unošene topline i raspodjela temperature ovisni su o polaritetu elektrode, vrsti zaštitnog plina, visini električnog luka, načinu zavarivanja (automatizirano ili ručno) te toplinskoj vodljivosti osnovnog materijala. Nadalje količinom i intenzitetom unošene topline određuje se geometrija zavarenog spoja. Sporo hlađenje zavara nastalo uslijed preintenzivnog unosa topline (ne oscilirajućom tehnikom rada, ne odgovarajućim polaritetom elektrode kod Mig/Mag zavarivanja) dolazi do pojave nesavršenosti u središtu skrućivanja taline zavara. To je ujedno i područje koje se zadnje skrućuje te na tom dijelu zaostaju elementi s najnižom točkom tališta i dolazi do pojave najvećih naprezanja. Ujedno je i to područje najčešćeg nastajanja toplih pukotina. Grublja struktura i veći omjer dubine u odnosu na širinu pripremljenog spoja još više pospješuju pojavu toplih pukotina u metalu zavara. Smanjenje konstituenata s nižom točkom taljenja i smanjenje zaostalih naprezanja U svrhu smanjenja zaostalih naprezanja i pojava nečistoća u zoni skrućivanja zavara potrebno je prilagoditi parametre (unos topline, vrsta zaštitnog plina, dodatni materijal) kako bi metal zavara bio što više jednak osnovnom materijalu. Odgovarajućom tehnikom zavarivanja kao što je naprimjer uporabom njihovih povećava se stopa nataljenog materijala a time i zavarljivost [5].

2.1.2. Utjecaj tehnike i redosljeda zavarivanja

Odabir najbolje tehnike i redosljeda zavarivanja ovisan je o svim prethodno nabrojanim faktorima koji utječu na zavarljivost materijala. Specijalne tehnike zavarivanja potrebne su prilikom pojave posebnih problema prilikom zavarivanja. Problemi se mogu pojaviti ako osnovni materijal nije zadovoljavajućih kemijskih svojstava. Prilikom zavarivanja materijala pri čemu fizikalna, metalurgijska svojstva osnovnog materijala se razlikuju od fizikalnih i metalurgijskih svojstava dodatnog materijala ili prilikom pojave velikih zaostalih naprezanja u materijalu.

Deformacije, pukotine u osnovnom i dodatnom materijalu te poroznost moguće je izbjeći ili smanjiti s odgovarajućom tehnikom rada. Gušće raspoređena „gusjenica“ zavara omogućuje deblje i čvršće slojeve metala zavara što se manifestira većom otpornošću na pojavu pukotina

tijekom hlađenja zavarenog spoja. Redoslijedom zavarivanja kao što je „backstep“ (slika 2) smanjuje se unos topline. Kad je to moguće zavar izvoditi od ukrućenog prema ne ukrućenom spojnom dijelu kako bi se na taj način omogućilo slobodno deformiranje spajanih dijelova te smanjila opasnost od pojave pukotina [5].



Slika 2. „Backstep“ redosljed zavarivanja [6]

2.2. Ispitivanje zavarljivosti

Zavarljivost se ne može jednoznačno odrediti nego je to skup raznih faktora koji moraju biti u određenim granicama kako bi se postigla zadovoljavajuća zavarljivost materijala.

Svaka analiza homogenosti, geometrije i svojstava (nosivosti zavarenih spojeva uz usporedbu sa svojstvima osnovnog materijala) je ispitivanje zavarljivosti [3].

Ispitivanje se provodi [7] :

- Ispitivanjem pojedinih svojstava materijala pomoću standardiziranih metoda bez prisustva zavora
- Zavarivanjem materijala i ispitivanjem zavarenog spoja (kod načina veliki utjecaj ima način izvođenja i stupanj sličnosti uvjeta ispitivanja i eksploatacijskih uvjeta)

Grupe ispitivanja [7]:

- Ispitivanje sklonosti povećanju tvrdoće (zakaljivanju) materijala prilikom zavarivanja
- Ispitivanje osjetljivosti na starenje materijala
- Ispitivanje sklonosti nastajanju krhkog loma
- Ispitivanje sklonosti stvaranju pukotina u zavaru i zoni utjecaja topline
- Ispitivanje osjetljivosti na pukotine kod visokočvrstih materijala
- Ispitivanje osjetljivosti na pojavu toplih pukotina

Ispitivanje sklonosti povećanju tvrdoće vrši se pomoću:

- C – ekvivalenta i TTT dijagrama (preko kemijske analize materijala)
- Metalografskim istraživanjem materijala
- Ispitivanjem tvrdoće
- Ispitivanjem zakaljivosti

Ispitivanje osjetljivost na starenje materijala:

- Stupanj osjetljivosti određuje se preko kritične temperature (odnosno temperature kod koje materijal prelazi iz plastičnog u krhko stanje)

Ispitivanje sklonosti nastajanju krhkog loma [7]:

- Ispitivanje žilavosti (mjerenje udarnog rada loma standardne epruvete uz postojanje zareza raznih oblika)
- Ispitivanje velikih zavarenih i ne zavarenih ploča (ispitivanje žilavosti pri uglavnom statičkom opterećenju vlačnim probama i probama savijanja na epruvetama sa ili bez zareza)
- Ispitivanje pomoću padajućeg bata
- Kizel proba
- Lehigh proba
- Van der Veen proba

- Kommerellova proba
- Navy Tear Test
- Bagsarova proba
- Kiler-Wagner-Gansamer proba
- Robertsonova proba
- Ispitivanje eksplozijom

Ispitivanje sklonosti nastajanju pukotina [7]:

- CTS (Controlled Thermal Severity)
- IMPLANT
- NIBLINK
- TRC (Tensile Restrain Cracking)
- RRC (Rigid Restraint Cracking)
- TEKKEN

Ispitivanje osjetljivosti na pukotine visokočvrstih materijala:

- Osjetljivost se određuje pomoću mehanike loma. Postoje razne metode pomoću kojih se određuje koeficijent K_{IC} pomoću kojeg se računa osjetljivost.
- CT (Compact Tension) proba

Ispitivanje osjetljivosti na tople pukotine:

- FOCKE – WULFF
- Metoda ispitivanja upetih limova
- Varestreint
- Murex

3. NIKAL I LEGURE NIKLA

Nikal (Ni) blizak je u periodičnom sustavu elementa željezu (Fe), te je po svojim mehaničkim i magnetskim svojstvima sličan željezu (Fe). Dobra svojstva su mu antikorozivnost, vatrootpornost (otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama), čvrstoća na visokoj temperaturi i otpor na puzanje. Zato se Ni (Slika 3) i Ni - legure koriste u kemijskoj i naftnoj industriji, parnim i plinskim turbinama, industrijskim pećima za električne otpornike, u elektronici i drugim granama industrije.



Slika 3. Komad rude nikla [8]

Ni ima plošnu centriranu kubnu rešetku odnosno austenitnu strukturu, pa su mu svojstva slična austenitnim čelicima. Međutim za razliku od čelika nikal ne prolazi fazne transformacije prilikom grijanja ili hlađenja [5].

Struktura Ni i Ni - legura je austenitna od sobnih temperatura do tališta, pa nije moguće toplinskom obradom smanjiti zrno. Zrno se može usitniti hladnom deformacijom i naknadnom toplinskom obradom. Austenitna struktura posjeduje dobru istezljivost i zavarljivost.

Prema načinu postizanja čvrstoće Ni legure se mogu podijeliti u dvije grupe [9]:

- Legure koje postižu mehanička svojstva (čvrstoću) legiranjem (Inconel 625) elementima koji su topivi u Ni, te s Ni stvaraju supstitucijske kristale mješance.

- Legure, koje postižu mehanička svojstva (očvršćavaju) precipitacijski (naknadnom toplinskom obradom) - dozrijevanjem (starenjem) (Inconel 725).

3.1. Zavarljivost legura nikla

Komercijalno važne visokolegirane legure nikla sadrže jedan ili više od sljedećih elemenata: bakar, krom, željezo, molibden i kobalt. Ovi glavni legirni elementi izuzev molibdena tvore jednofazne spojeve s niklom unutar zadanih granica koncentracije te imaju relativno mali utjecaj na zavarljivost. Molibden kada je dodan u količini većoj od 20 % tvori sekundarnu fazu s niklom, unatoč tome komercijalne legure nikla s udjelom jedne i druge faze su lako zavarljive.

Elementi kao što su magnezij, ugljik, silicij, aluminij, mangan, titan i niobij dodaju se u vrlo malim količinama, te ne utječu na zavarljivost ako je njihov udio u propisanim granicama.

Ostali elementi kao što su sumpor i olovo praktički su netopivi u niklu te tvore eutektičke faze koje uzrokuju nastajanje toplih pukotina zavora. Spomenute elemente treba izbjegavati ili drugim sredstvima osigurati ne mogućnost pojave u metalu zavora ili zoni utjecaja topline.

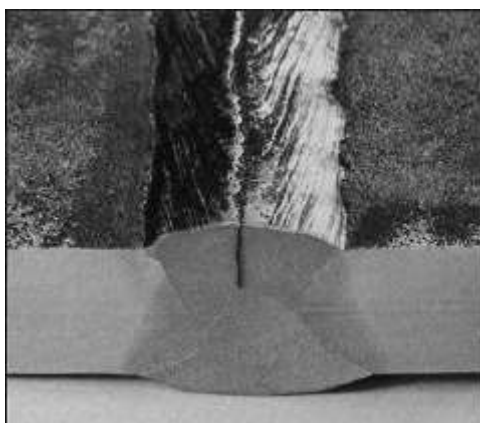
Ako nije korištena odgovarajuća tehnologija zavarivanja i dodatni materijal utjecaj plinova kod nikla i visokolegiranih legura nikla bez sadržaja kroma može dovesti do pojave poroziteta. Dodatni materijali sadrže elemente kao što je titan koji eliminiraju utjecaj plinova i nastajanje poroznosti. Visokolegirane legure nikla koriste se prvenstveno zbog svoje velike otpornosti prema koroziji i visokotemperaturnom otpornošću. Dostupan je širok izbor niklenih legura, međutim najzastupljenije su legure nikal-bakar te nikal-krom-željezo [5].

Glavni problemi koji se mogu javiti pri zavarivanju su [9]:

- Pojava toplih pukotina (slika 4) koje su najčešće uzrokovane prisutnošću niskotaljivih elemenata: S, Pb, P, B, Zr, Mg i dr. Nečistoće ovih elemenata s površine interkristalno prodiru u unutrašnjost strukture i uzrokuju pukotine. Potrebno je dobro odmastiti i očistiti rubove četkanjem četkama od nehrđajućeg austenitnog čelika u širinu oko 25 mm

sa svake strane zavora, zbog visokih temperatura zagrijavanja osnovnog materijala u zoni utjecaja topline, kako bi se što više smanjio utjecaj gore nabrojanih nečistoća na nastajanje pukotina.

- Prisustvom plinova: H_2 , O_2 , N_2 , CO_2 najčešći je uzrok poroznosti. Nikal u rastaljenom stanju otapa 2 puta više vodika, nego austenitni CrNi čelik, a 3 puta više nego opći konstrukcijski čelik. Sprječavanje poroznosti pospješuje se zavarivanjem uz što kraći električni luk, čistim rubovima i odgovarajućim zaštitnim plinom.
- Prije postupka zavarivanja potrebno je ukloniti okside s površine materijala, budući da Ni oksid ima višu točku taljenja, pa dolazi do greške vezivanja i oksidnih uključaka. Debeo sloj oksida se stvara pri zavarivanju, toplinskim obradama i drugim toplinskim operacijama. Prije zavarivanja preporučuje se odstranjivanje oksida s površine brušenjem, pjeskarenjem ili kemijskim nagrizanjem kiselinama.



Slika 4. Vruća pukotina [8]

3.1.1. Utjecaj glavnih legirnih elemenata

Dodavanjem glavnih legirnih elemenata utječe se na čvrstoću legure, povećava se otpornost na koroziju te visokotemperaturna otpornost, a ujedno ne dolazi do znatnog narušavanja zavarljivosti [5].

3.1.1.1. Bakar

Bakar tvori čitav niz čvrstih spojeva s niklom te ne utječe značajno na zavarljivost. Legure nikla i bakra osjetljive su na nečistoće kao što su sumpor u zoni taljenja i zoni utjecaja topline te može doći do poroziteta metala zavora.

3.1.1.2. Krom

Krom jednako tako kao i bakar tvori čvrste spojeve s niklom. Iako se legure nikla i kroma pokazuju vrlo dobro zavarljivima, sklone su nastajanju toplih pukotina u odnosu na nikal ili legure nikla i bakra. Međutim krom smanjuje pojavu poroziteta zbog afiniteta prema stvaranju stabilnih oksida i nitrida [5].

3.1.1.3. Željezo

Željezo je prisutno u sastavu većine niklenih legura do 10 %, te ne utječe primjetno na zavarljivost. Ne dodaje se direktno za poboljšanje svojstava legura nego kao dio sastava ostalih legiranih elemenata. Međutim sumpor, fosfor te posebno kisik kao dio sastava željeza mogu dovesti do toplih pukotina u zavaru.

3.1.1.4. Molibden

Molibden u postotku većem od 20 % tvori sekundarnu fazu s niklom, no ne utječe bitno na zavarljivost.

3.1.1.5. Kobalt

Utjecaj kobalta u visokolegiranim legurama nikla je mali. Većina legura koje sadrže u svom sastavu kobalt precipitacijski očvršnu te posjeduju podjednaku zavarljivost kao ostale niklene legure [5].

3.1.2. Manje zastupljeni legirni elementi

Manje zastupljeni kemijski elementi općenito se dodaju niklu i niklenim legurama kako bi se pospješila dezoksidacija, livljivost taline te precipitacijsko očvršnuće. Neki od elemenata sastojak su i dodatnog materijala kako bi se povećala otpornost prema pojavi vrućih pukotina i poroznosti [5].

3.1.2.1. Ugljik

Ugljik kao sastojak legura primarno je važan kod kovanih legura nikla. Komercijalne legure nikla sadrže od 0,04 % do 0,07 % ugljika, što je zadovoljavajuće za većinu primjena na temperaturama manjim od 370 °C. Međutim na temperaturama višim od 370 °C zona utjecaja topline može s vremenom postati krhka zbog izlučivanja grafita na granicama kristalnih zrna. Na temperaturama primjene do 370 °C topivost ugljika u niklu je niska (0,02 do 0,03 %) ali s povećanjem temperature značajno se povećava i topivost ugljika. Tijekom zavarivanja grafit se otapa u zoni utjecaja topline te stvara zasićene kristale mješance. Kasnije u eksploataciji nakon precipitacijskog očvršnuća dolazi do izlučivanja grafita po granicama zrna i krhkosti u zoni utjecaja topline. Zbog spomenutog problema važna je kontrola koncentracije ugljika za visokotemperaturnu primjenu niklenih legura. Za visoku temperaturnu primjenu (iznad 370 °C) potrebno je koristiti legure s do 0,02 % ugljika. Prilikom zavarivanja potrebno je izvoditi zavare s manjim depozitom ili koristiti dodatni materijal s dodatkom titana te koristiti zaštitne plinove bez sadržaja ugljika [5].

Dodatkom bakra izbjegava se grafitna krhkost u zoni utjecaja topline niklenih legura. Sadržaj ugljika od 0,15 – 0,20 % ne utječe na zavarljivost niklenih legura osim ako dolazi do jakog miješanja sa željezom (navarivanjem). Kako bi se osigurao zavar od nastajanja toplih pukotina potreban udio ugljika je manje od 0,10 %.

U legure nikla koje sadrže i krom, ugljik tvori s kromom kromove karbide. Dodatkom jakih karbidotvoraca kao što su titan i niobija izbjegava se stvaranje kromovih karbida u zoni utjecaja topline. Ako se legura upotrebljava i u iznimno korozivnoj atmosferi pri visokim

temperaturama poželjna je naknadna toplinska obrada nakon zavarivanja kako bi se spriječilo izlučivanje kromovih karbida na granicama zrna [5].

3.1.2.2. Magnezij

Magnezij osigurava kovkost prilikom kovanja niklenih legura tako da tvori sa sumporom visoko taljive sulfide. Vezivanjem u sulfidne spojeve sprječava nastajanje toplih pukotina u zoni utjecaja topline.

3.1.2.3. Silicij

Utjecaj silicija varira ovisno o vrsti legure i tehnologije zavarivanja. Udio silicija u legurama nikla najčešće je od 0,1 do 0,4 %. Silicij uglavnom loše utječe na zavarljivost jer stvara tendenciju prema nastajanju vrućih pukotina. Nepovoljan utjecaj silicija općenito je sadržan u stvaranju eutektika niže temperature taljenja od osnovnog materijala što loše utječe na talinu zavara.

3.1.2.4. Niobij

Niobij se dodaje legurama nikla kako bi se povisila čvrstoća legure ili pospješilo očvrnuće legure dozrijevanjem (starenjem). Ujedno se pospješuje stvaranje karbida, te se dodaje kako bi se smanjio utjecaj sumpora i silicija na zavarljivost niklenih legura.

3.1.2.5. Mangan

Mangan se dodaje nikal-bakar i nikal-krom-željezo dodatnom materijalu u sastavu od 3 % kako bi se spriječilo nastajanje toplih pukotina [5].

3.1.2.6. Titan i aluminij

Titan i aluminij dodaju se prvenstveno kao sastojci zbog precipitacijskog očvrnuća, te precipitacijom nastaju $Ni_3(Al, Ti)$ „gramma prime“ elementi. U manjim količinama titan se dodaje dodatnom materijalu kako bi se smanjio utjecaj zaštitnog plina, a aluminij za sprječavanje deoksidacije kovanog nikla. Dodatak titana i aluminija pozitivno utječe na zavarljivost. Međutim pretjeranom količinom titana i aluminija povećava se opasnost od nastajanja pukotina.

3.1.2.7. Bor i cirkonij

Bor i cirkonij dodaju se visokolegiranim legurama nikla kako bi se poboljšala visokotemperaturna svojstva legure. Udjelom od 0,03 % ili više, bor vrlo negativno utječe na zavarljivost i pospješuje nastajanje toplih pukotina stvaranjem eutektoida.

Cirkonij u postotku većem od jednog postotka pospješuje stvaranje toplih pukotina u zoni utjecaja topline stvaranjem eutektoida [5].

3.1.3. Utjecaj nečistoća

Elementi koji posjeduju vrlo malo topivost u niklenim legurama i elementi skloni stvaranju eutektoida nepogodni su za kovkost te djeluju štetno u pogledu stvaranja toplih pukotina. Prilikom brzog zagrijavanja i hlađenja kod zavarivanja netopivi elementi ili krhki niskotaljivi elementi pogrubljuju zrna ili se izlučuju po granicama zrna što vrlo loše utječe na zavarljivost. Visokolegirane legure nikla vrlo su osjetljive na nečistoće te posebnu pažnju treba posvetiti prilikom zavarivanja na pojavu nečistoća u talini zavara i zoni utjecaja topline. Sumpor je jedan od najštetniji elemenata za niklene legure. U kombinaciji s čistim niklom stvara eutektike čija je temperatura taljenja oko 300 °C (ili u krom-nikl legurama 650 °C) što se manifestira pojavom toplih pukotina. Olovo kao nečistoća u niklu i njegovim legurama čak i u vrlo niskim količinama izlučuje se po granicama zrna te izaziva krhkost zavara. Prilikom zavarivanja potrebno je kontrolirati visinu luka i utjecaj zaštitnih plinova [5].

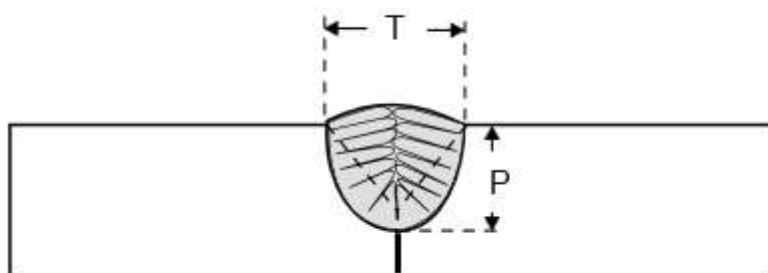
3.1.3.1. Tople pukotine

Tople pukotine nastaju pri kristalizaciji i hlađenju zavarenog spoja na relativno visokim temperaturama (od temperature kristalizacije do oko 900 °C), odnosno temperature skrućivanja. Nastaju u zoni taljenja i/ili u zoni utjecaja topline. Uzrok nastajanja toplih pukotina prvenstveno je pojava nisko taljivih eutektika u obliku nečistoća (bakar, sumpor, fosfor) čija je temperatura skrućivanja mnogo niža od temperature skrućivanja ostalog materijala (oko 300 °C). Pukotine nastaju kao posljedica interkristalnih razdvajanja prilikom taljenja ili omekšavanja nakupina nečistoća izlučenih na granicama zrna uslijed djelovanja naprezanja (vlačnog) uslijed hlađenja zavarenog spoja [3].

Tople pukotine dijele se na dvije vrste:

- Kristalizacijske – nastaju na temperaturama između granica likvidusa i solidusa u zoni taljenja prilikom hlađenja rastaljenog materijala u žlijebu zavora. Prvo dolazi do kristalizacije metala zavora, a eventualne nečistoće ostaju zarobljene između kristala – dendrita u gornjoj zoni zavora. Djelovanjem naprezanja prilikom hlađenja dolazi do nastajanja tople pukotine na mjestu koncentracije nečistoća.
- Likvacijske – nastaju na temperaturama ispod granice solidusa do tališta visoko taljivih faza eutektika (pojavljuju se najčešće u zoni utjecaja topline). Posljedica su postojanja strukturnih nehomogenosti – nečistoća raspoređenih po granicama zrna osnovnog materijala u ZUT – u. Djelovanjem naprezanja pri hlađenju zavora dolazi do nastajanja pukotina podsloidusnog ili likvacijskog tipa na mjestima prisutnosti nečistoća koje su potpuno ili djelomično rastaljene. U zoni utjecaja topline ne dolazi do taljenja osnovnog materijala, ali dolazi do omekšavanja i pada čvrstoće na granicama zrna i taljenja tankih slojeva nečistoća [3].

Jedan od bitnih faktora je izgled žlijeba (omjer visine i širine) zavarenog spoja slika. Pravilnim odabirom omjera bitno se utječe na raspored naprezanja unutar zavarenog spoja i lakše izlaženje nečistoća na površinu. Velika penetracija u odnosu na širinu zavarenog spoja ($P/T > 1$) pospješuje stvaranje toplih pukotina (slika 5) Preporučeni odnos između širine i dubine zavarenog žlijeba je 1:1 do 1,4:1 u korist širine žlijeba [10].



Slika 5. Odnos širine i dubine zavora [10]

Skлонost materijala nastajanju toplih pukotina može se smanjiti unosom topline, povećanjem brzine zavarivanja, uklanjanjem nečistoća kao što su sumpor i fosfor čišćenjem prije zavarivanja, uklanjanjem prevelikog zazora između komada.

3.1.4. Utjecaj plinova

Nikal i legure nikla u rastaljenom stanju osjetljive su na otapanje plinova i nastajanje poroziteta. Dušik, ugljični dioksid, ugljični monoksid i kisik smatraju se najvećim uzrokom nastajanja poroziteta u zavarima visokolegiranih niklenih legura. Uporabom dodatnog materijala koji u sebi sadrži titan sprječava se poroznost zavora izazvana nabrojanim plinovima [5].

3.2. Tehnologije zavarivanja nikla i legura nikla

Zavarivanje Ni i Ni legura je moguće svim postupcima zavarivanja koji se koriste za čelike. Više pažnje treba posvetiti pri zavarivanju legura, koje se očvršćavaju toplinskom obradom. Otvor žlijeba trebao bi biti malo više otvoren, zbog slabog kvašenja i širenja taline niklenih legura u usporedbi s čelikom.

Budući da je čistoća materijala prilikom toplinske obrade i zavarivanja vrlo bitna prije provedbe spomenutih postupaka trebalo bi očistiti i odmastiti površinu od nakupljenih nečistoća tj. drugih elemenata. Niklene legure vrlo su osjetljive na prisustvo nisko taljivih

materijala kao što su S, P, Cl, B, Pb koji ujedno predstavljaju nečistoće. Zbog prisustva gore nabrojanih elemenata u raznim uljima, mastima, bojama, radioničkoj prašini, sredstvima za

označavanje potrebno je očistiti i odmastiti sve površine koje će biti podvrgnute toplinskoj obradi ili zavarivanju.

Nakon provedbe zavarivanja zbog prisustva sumpora u troski potrebno je očistiti zavareni spoj. Prisutnost sumpora posebno je štetna prilikom podvrgavanja zavara visokim radnim temperaturama. Zbog prisustva elemenata koji omogućuju očvrnuće legura naknadnom toplinskom obradom stvaraju se visoko temperaturno taljivi oksidi. Nastali oksidi imaju višu temperaturu taljenja od osnovnog materijala te ih je potrebno otkloniti s površine koja se zavaruje ili toplinski obrađuje kako bi se smanjila mogućnost pojave grešaka kao što su greške vezivanja, nepotpuna penetracija ili uključci oksida.

Okside s površine moguće je odstraniti mehanički obradom odvajanja čestica (brušenjem, pjeskarenjem, sačmarenjem, četkanjem) ili kemijskim sredstvima. Alati koji se primjenjuju trebali bi biti od nehrđajućeg čelika te čisti i ne kontaminirani česticama drugih materijala [4].

Masnoće i prljavštinu s dodatnoga i osnovnog materijala potrebno je odstraniti alkoholom ili acetonom te brisati čistim krpama, koje ne ostavljaju niti. Uporaba prljave krpe može uzrokovati pojavu pukotina na površini uslijed kontaminacije gore nabrojanim nečistoćama.

Unosom dodatne topline predgrijavanjem, međuprolaznom temperaturom i prevelikim unosom topline izvora struje nije pogodno, no nije niti jako štetno. Zavarivanje je bolje provesti s manjim unosom topline. Preveliki unos topline može uzrokovati likvaciju, izlučivanje i druge metalurške pojave, koje mogu rezultirati vrućim pukotinama zavarenog spoja.

Prilikom zavarivanja hladnog materijala preporučljivo je predgrijavanje na 20 °C kako bi se izbjegla kondenzacija vlage, koja može uzrokovati poroznost zavara. Pri radu s velikim

unosom topline ili visokom temperaturom između prolaza, a uz slabu zaštitu plina može doći do stvaranja debelog sloja oksida, koji uzrokuje različite greške i grubu površinu zavora. Zavarivanje se provodi bez predgrijavanja (osim u početku za odstranjenje kondenzirane

vlage) uz što niži unos topline te uz ograničenje međuprolazne temperature npr. na 100 °C. Ako je potrebno, zavar se može hladiti vodom. Izbor dodatnog materijala ovisi o osnovnom te je potrebno odabrati dodatni materijal što bliži po kemijskom sastavu osnovnom.

Kod legura koje postižu višu čvrstoću toplinskom obradom potrebno je nakon zavarivanja podvrgnuti naknadnoj toplinskoj obradi kako bi svojstva zavora bila što sličnija osnovnom materijalu. Visinu električnog luka potrebno je držati što kraćom (1-2 mm). Korijsku stranu zavora preporučljivo je štititi zaštitnim plinom argonom [4].

4. PODRUČJE PRIMJENE LEGURE INCONEL 625

Legura Inconel 625 sastoji se od nikla, kroma, molibdena i niobija. Ističu se izvrsnim svojstvima otpornosti prema puzanju uz visoku korozivsku postojanost te se stoga vrlo često primjenjuju u naftno - petrokemijskim postrojenjima. S obzirom na poprilično visoku cijenu legure Inconela 625 gdje je to moguće nanose se na ugljični čelik u obliku dodatnog materijala – navarivanjem (Slika 6). Niklene legure mogu se različitim postupcima (valjanjem, eksplozijskim oblaganjem, navarivanjem) na nositi na osnovni materijal. Budući da je postupak navarivanja relativno jednostavan i jeftin široko se upotrebljava za poboljšanje svojstava prema koroziji različitih dijelova opreme u naftno-petrokemijskoj, procesnoj i sličnim industrijama. Željezo Fe ima najveći utjecaj na svojstva navarenog sloja tj. otpornost prema koroziji, te ne smije prelaziti 5 % [11].



Slika 6. Navarivanje Inconela 625 [12]

Inconel 625 legura izvrsne je čvrstoće od sobne temperature do približno 800 °C. Posjeduje dobru otpornost na oksidiranje sve do 980 °C. U nisko temperaturno žarenom stanju primjenjuje se u vlažnim korozivnim atmosferama u rasponu temperatura od -196 do 450 °C. Za primjene na temperaturama iznad 600 °C koristi se u visoko temperaturno žarenom stanju. Toplinskom obradom povećava se čvrstoća legure [13].

Nisko temperaturno žarenom stanju legura Inconela 625 upotrebljava se ponajviše u naftno-petrokemijskoj industriji, procesnoj industriji, izgradnji brodova.

Tipična primjena legure:

- Oprema za proizvodnju fosforne kiseline,
- Postrojenja za obradu radio-aktivnog otpada,
- Izrada cijevi u naftnoj i petrokemijskoj industriji,
- Za postrojenja izložena morskoj vodi,
- Postrojenja za peći.

Kod primjena na temperaturama višim od 1000 °C (izrada posuda pod tlakom) upotrebljava se legura Inconea 625 u visoko temperaturno žarenom stanju [13, 14].

Karakteristike Inconela 625 u nisko temperaturno žarenom stanju [13]:

- Izuzetna otpornost prema rupičastoj koroziji, koroziji u procijepu, eroziji i interkristalnoj koroziji
- Otpornost prema kloridima induciranoj napetosnoj koroziji
- Dobra otpornost prema mineralnim kiselinama kao što su dušična, fosforna, sumporna i klorovodična kiselina
- Otpornost prema lužinama i organskim kiselinama
- Dobra mehanička svojstva

Karakteristike Inconela 625 u visoko temperaturno žarenom stanju [13]:

- Odlična otpornost prema puzanju iznad temperature 600 °C
- Dobra korozijska otpornost prema vrućim korozivnim plinovima

Tablica 1. Kemijski sastav legure Inconel 625 [13]

	Ni %	Cr %	Fe %	C %	Mn %	Si %	Co %	Al %	Ti %	P %	S %	Mo %	Nb + Ta%
Min.	58	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	3,2
Max.	71	23	5	0,03	0,5	0,4	1	0,4	0,4	0,01	0,01	10	3,8

4.1. Mikrostruktura

Inconel 625 sastoji se od kristala plošno centrirane kubične rešetke (FCC). Kod temperatura od 600 do 900 °C Ni_3Nb (gama i delta) tvore nikl – kromnu mikrostrukturu. Pri nižim temperaturama prvo se stvara metastabilna gama faza iz koje kasnije nastaje stabilna delta faza. Mehanička svojstva poboljšavaju se precipitacijskim očvrscučenjem. Međutim sastav od delta faze također dovodi do gubitka istezljivosti.

Kod visoko temperature obrade između 600 i 900 °C po granicama zrna izlučuju se Cr_{23}C_6 karbidi te se tako smanjuje otpornost prema interkristalnoj koroziji. Ovako nastali karbidi po granicama zrna vraćaju se u unutar kristalnih zrna naknadnim zagrijavanjem do 980 °C te sporim hlađenjem ili mekim žarenjem [13, 14].

5. SPECIFIČNE TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA LEGURE INCONEL 625

Zavarivanje kao proces spajanja metala taljenjem općenito uključuje unos topline. Većina elektrolučnih procesa zavarivanja uključuje visok unos topline u osnovni i dodatni materijal, što s druge strane doprinosi mnoštvu problema kao što su: pregaranje, deformacije, poroznost, rast kristalnih zrna. Odabir odgovarajuće tehnologije, postupka i parametara zavarivanja osnova je za izbjegavanje gore nabrojanih problema.

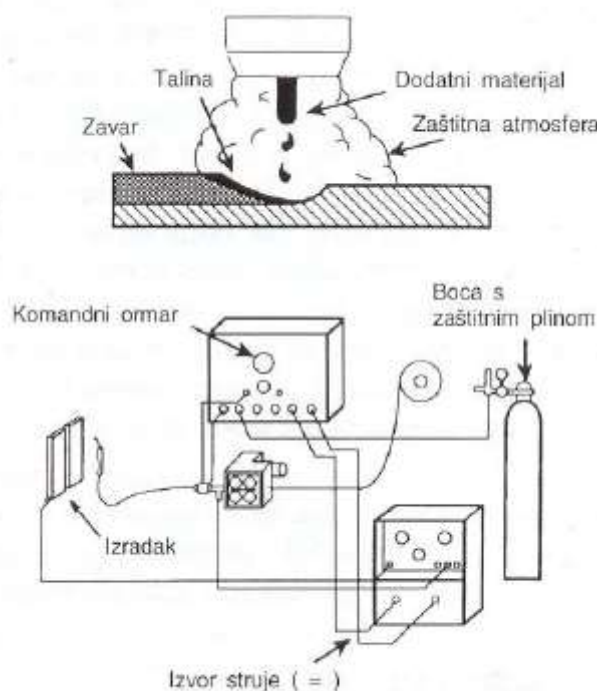
Inconel 625 zavarljiv je TIG, MIG/MAG postupkom zavarivanja, elektronskim snopom, elektrootpornim zavarivanjem. Elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP) nije preporučljivo zbog prevelikog unosa topline u osnovni materijal i sporog hlađenja zavar. Nabrojani faktori dovode do zaostalih naprezanja u zavaru i pojavu pukotina.

Prilikom zavarivanja predgrijavanje nije potrebno jer je temperatura predgrijavanja uobičajeno jednaka sobnoj temperaturi. Temperatura među prolaza trebala bi biti ispod 90 °C. Naknadna toplinska obrada u većini slučajeva nije potrebna [13].

5.1. MIG/MAG postupak zavarivanja

MIG/MAG postupak zavarivanja (engl. Metal Active Gas) vrsta je elektrolučnog zavarivanja taljenjem u zaštiti inertnog/aktivnog plina (obično inertnog argona, helija ili aktivnog ugljikov dioksida CO₂) ili u plinskoj smjesi (argon + ugljikov dioksid, argon + ugljikov dioksid + kisik) taljivom elektrodom u obliku gole žice ili praškom punjene žice. Postupak zavarivanja ostvaruje se taljenjem dodatnog i osnovnog materijala uslijed gorenja električnog luka. Zavarivanje se općenito provodi spajanjem elektrode (dodatnog materijala) na + pol istosmjernog izvora struje. MIG/MAG postupak zavarivanja izvodi se u svim položajima [13].

MAG postupak zavarivanja (slika 7) značajno je zastupljen kod zavarivanja opće konstrukcijskih čelika. zbog velike prednosti u odnosu na ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (REL) s obzirom na količinu nataljenog materijala u jedinici vremena. Postupak je vrlo pogodan za robotizaciju, tako da je značajan udio robota za MIG/MAG zavarivanje u odnosu na sveukupni broj robota u svijetu.



Slika 7. Shematski prikaz MIG/MAG postupka zavarivanja [16]

MIG/MAG postupak pogodan je za zavarivanje velike većine materijala (ugljični čelik, aluminij, nehrđajući čelici, magnezij, bakar, nikl, bronca) u širokom rasponu debljina.

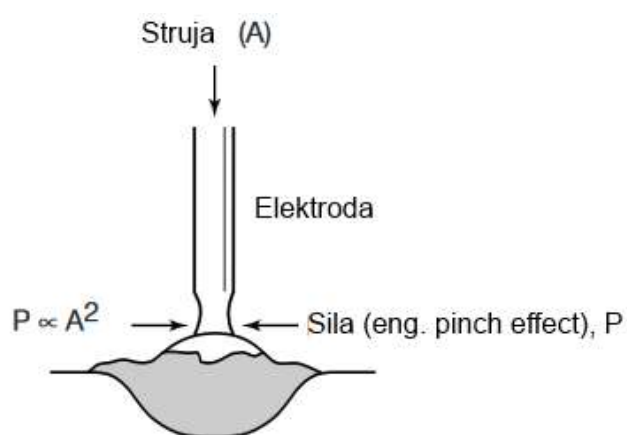
5.1.1. Metode prijenosa metala

Debljina dodatnog materijala i jakost struje zavarivanja ponajviše ovise o debljini osnovnog materijala. Metode prijenosa dodatnog materijala kod MAG zavarivanja mogu biti: kratkim spojevima, prijelazni luk i štrcajući luk. Područje napona luka i jakosti električne struje za kratki spoj je 13-21 V i 50-170 A, za prijelazni luk 22-25 V i 170-235 A, a za štrcajući luk 25-40 V i 200-600 A [17].

5.1.1.1. Prijenos metala u području kratkih spojeva

Zavarivanje električnim lukom u području kratkih spojeva (engl. short arc) daje najmanji unos energije u zavareni spoj (pogodno za zavarivanje tankih limova, korijena zavora). Prijenos

materijala u području kratkih spojeva ostvaruje se fizičkim kontaktom elektrode (dodatnog materijala) s osnovnim materijalom koji se može ispostaviti i do 200 puta u sekundi. Prilikom kontakta vrha elektrode s radnim komadom raste struja zavarivanja te sa strujom raste iznos magnetske sile na vrhu elektrode. Elektromagnetsko polje koje okružuje elektrodu izaziva silu koja rastaljenu kapljicu odvaja od vrha elektrode (eng. pinch effect) prikazano na slici 8. Prijenos materijala kratkim spojevima upotrebljava se najčešće na debljinama osnovnog materijala od 0,6 mm – 5 mm uz debljinu dodatnog materijala od 0,6 do 1,2 mm [15].



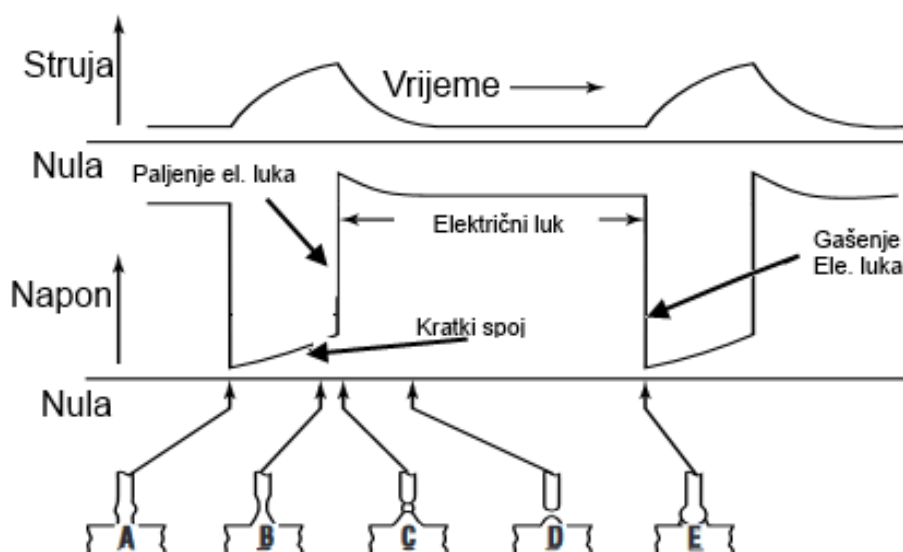
Slika 8. „Pinch efekt“ [15]

Način prijenosa metala kratkim spojevima prikazan slici 9 sastoji se od 5 koraka.

- Korak A – Fizičkim dodiranjem između metala zavora i dodatnog materijala (elektrode) napona pada, a struja zavarivanja počinje rasti.
- Korak B – Uslijed djelovanja elektromagnetske sile dolazi oblikovanje kapljice te kako se kapljica odvaja napon počinje polako rasti, a struja nastavlja dalje rasti prema vršnoj vrijednosti struje zavarivanja.
- Korak C – Dolazi do odvajanja kapljice dodatnog metala, te u toj točki struja doseže svoju maksimalnu vrijednost. Kapljica uslijed djelovanja elektromagnetskih sila, sile teže i sile površinske napetosti odlazi u talinu zavora.
- Korak D – Žica dodatnog materijala nema kontakta s talinom zavora te se pod zaštitom električnog luka približava talini zavora.

- Korak E – Proces prijenosa metala ponovno započinje [15].

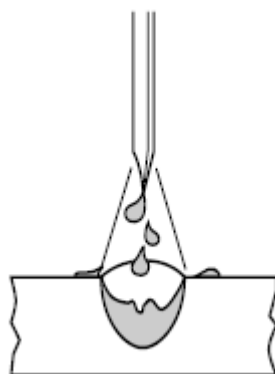
Bitni nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima su veća količina štrcanja i mali učinak taljenja, te velika vjerojatnost pojave naljepljivanja.



Slika 9. Postupak odvajanja kapljice [15]

5.1.1.2. Prijenos metala prijelaznim lukom

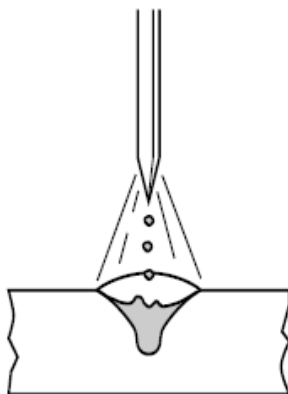
Prijenos metala prijelaznim lukom kombinacija je prijenosa materijala štrcajućim lukom i kratkim spojevima. Prilikom prijenosa materijala štrcajućim lukom dolazi do nepravilnog odvajanja većih kapljica s vrha elektrode koje padaju u talinu. Posljedica takvog prijenosa materijala je više prskanja zbog povremenih pojava kratkih spojeva. Zavarivanje u području prijelaznog luka se izbjegava zbog teške kontrole zavarivanja, ograničenja na horizontalne položaje zavarivanja i loše kvašenje taline što može uzrokovati pojavu pukotina, nepotpuno spajanje materijala. Prijelazni luk često se pojavljuje prilikom zavarivanja u zaštiti plina 100 % CO₂ ili uporabom mješavina s visokim udjelom CO₂. Prijenos metala prijelaznim lukom prikazan je na slici 10 [15].



Slika 10. Shematski prikaz prijelaznog luka [15]

5.1.1.3. *Prijenos metala štrcajućim lukom*

Prijenos metala štrcajućim lukom (slika 11) odvija se bez direktnog dodira elektrode s osnovnim metalom slobodnim letom kapljica kroz zaštitnu atmosferu električnog luka. Postupak se odvija pomoću sila koje radialno djeluju na vrh elektrode te okidaju kapi i usmjeruju ih u talinu zavora. Otkinute kapljice manjeg su promjera od promjera elektrode te ih u jednoj sekundi može biti više od nekoliko stotina. Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira veliki unos topline i količine nataljenog materijala te se takav način prijenos materijala primjenjuje za zavarivanje debelih komada. Ovisno o promjeru elektrode i zaštitnom plinu štrcajući luk se može pojaviti od struja 155 A za promjer elektrode 0,8 mm do 265 A za promjer elektrode od 1,6 mm. Neke od prednosti štrcajućeg luka su visoka stopa nataljenog materijala, lijep izgled zavora, visoka proizvodnost. Nije pogodan za zavarivanje u svim položajima [15].



Slika 11. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [15]

5.1.1.4. Prijenos metala impulsnim strujama

Osim nabrojanih oblika prijenosa metala u električnom luku koristi se prijenos metala upravljan djelovanjem impulsnih električnih struja, takav se luk naziva impulsni luk. Za prijenos metala impulsnim strujama može se reći da je to visoko kontrolirana varijanta prijenosa metala štrcajućim lukom. Prilikom zavarivanja struja varira između vršne vrijednosti struje zavarivanja i minimalne (osnovne impulsne struje). Osnovna struja osigurava održavanje električnog luka, dok vršna impulsna struja osigurava odvajanje kapljica dodatnog materijala. Razmak između vršne i minimalne struje označuje period koji kontrolira uređaj. Ovisno o vrsti impulsa kod zavarivanja, mogu se koristiti sinusoidni oblik impulsa, pravokutni oblik te drugi oblici impulsa poput trapeznog ili trokutastog. Elektromagnetska sila i sile površinske napetosti jedne su od glavnih sila koje utječu na prijenos metala. Upravo je mogućnost upravljanja elektromagnetskom silom omogućila razvoj impulsnih struja. Impulsno zavarivanje izvodi se u svim položajima bez rasprskavanja kapljica [15].

5.1.2. Utjecaj parametara kod MIG/MAG postupka zavarivanja

Parametri zavarivanja koji utječu na kvalitetu zavarenog spoja su jakost struje, napon, induktivitet, brzina zavarivanja i protok zaštitnog plina, a kod impulsnog zavarivanja to su još: osnovna, impulsna te srednja struja zavarivanja kao trajanje i frekvencija impulsa.

Jakost struje zavarivanja odabire se prema vrsti i debljini materijala, obliku spoja, položaju zavarivanja i promjeru žice. Jakost struje regulira se brzinom dodavanja žice preko mehanizma za dovođenje žice.

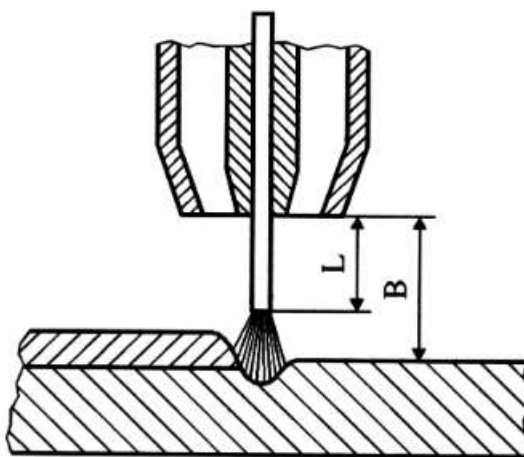
Prekomjerno povećanje jakosti struje dovodi do većeg prskanja i veće penetracije što kod navarivanja nije dobro jer dolazi do povećanog miješanja osnovnog i dodatnog materijala.

Napon električnog luka utječe na širinu zavara te zavisi direktno o dužini luka. Što je duži luk veći je napon time i širina zavara te penetracija. Smanjenjem napona povećava se nadvišenje zavara.

Brzina zavarivanja zavisi o položaju zavarivanja. Velika brzina daje uzak zavar i veliko nadvišenje dok mala daje veliku količinu taline što može dovesti do naljepljivanja i uključaka.

Promjer žice se odabire prema debljini osnovnog materijala tako da se odabiranjem većeg promjera uz veću jakost struje ostvaruje veći učinak taljenja [15].

Slobodni kraj žice (slika 12) predstavlja udaljenost od izlaza iz kontaktne vodilice do mjesta početka gorenja luka. Povećanjem dužine dobiva se veći učinak taljenja. Preporuka odabira dužine slobodnog kraja žice je $10 \times \varphi$ žice. Prekomjernim povećanjem dolazi do iskrivljenja zavara i nemirnog luka dok prekomjerno smanjenjem dolazi do povećanog onečišćenja sapnice [15].



Slika 12. Slobodni kraj žice (L) i udaljenost sapnice od radnog komada (B) [17]

5.1.2.1. Zaštitni plinovi

Dobar odabir zaštitnog plina jedna je od važnijih stvari za izradu kvalitetnih zavara zavarivanjem MIG/MAG postupkom. Tri bitne osobine zaštitnog plina su:

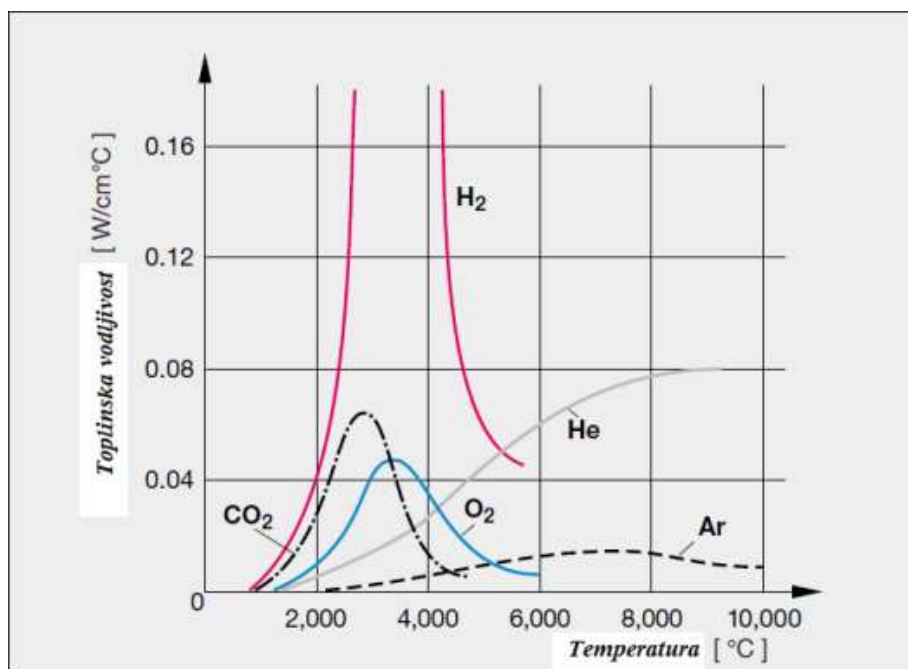
- Ionizacijski potencijal plina
- Toplinska vodljivost plina
- Kemijska reaktivnost plina s rastaljenim metalom zavara

Argon i helij inertni su plinovi koji se upotrebljavaju za zaštitu zavara od okolne atmosfere. Argon u usporedbi s helijem posjeduje manju toplinsku vodljivost i energiju ionizacije zbog čega se lakše uspostavlja električni luk ali dolazi i do manje penetracije. Kao čisti plin argon se upotrebljava prilikom zavarivanja nikla, bakra, aluminijske, titana, magnezija i magnezijevih legura. Helij se često dodaje u mješavine za zaštitu prilikom zavarivanja nehrđajućeg čelika i aluminijske. Odlikuje se visokom toplinskom vodljivošću te omogućuje širok zavar uz nešto nižu penetraciju od argona.

CO₂ inertan je plin na sobnoj temperaturi no pod utjecajem električnog luka u plazma stanju postaje aktivan. Uslijed visoke energije električnog luka i spajanja elektrode na + pol izvora struje dolazi do razbijanja (disocijacije) molekula CO₂ na ugljik, ugljični monoksid i kisik. Dolaskom na – pol radnog komada dio plinova stvara ponovno molekula CO₂, dok preostali dio reagira s talinom zavara te s legiranim elementima stvara okside. Prilikom ponovnog stvaranja CO₂ dolaskom plinova na hladniju katodu, dolazi do velikog oslobađanja energije što ima za posljedicu veliku penetraciju u osnovni materijal.

Kisik (O₂) - u malim količinama 1-5 % u mješavini s argonom pruža dobru stabilnost luka i odličan izgled zavara.

Vodik (H₂) - u malim količinama 1-5% u mješavinama s argonom služi kao zaštitni plin pri zavarivanju nehrđajućih čelika i legura nikla. Velika toplinska vodljivost rezultira poboljšanim kvašenjem i omogućuje veće brzine zavarivanja. Na slici 13 prikazana je ovisnost toplinske vodljivosti zaštitnih plinova o temperaturi [17].



Slika 13. Ovisnost toplinske vodljivosti plinova o temperaturi [18]

Mješavina plinova Ar – CO₂ najčešće su primjenjivane dvokomponentne plinske mješavine. Moguće su sve četiri metode prijenosa metala. Disociranjem CO₂ u električnom luku oslobađa se kisik koji daje talini dodatnu žitkost i doprinosi stabilizaciji luka. Svojom visokom toplinskim vodljivošću, CO₂ također utječe i na veću širinu provara. Prijenos metala štrcajućim lukom zahtijeva količinu ugljičnog dioksida manju od 18 %. Porastom udjela CO₂ raste unos topline, a time i opasnost od pregaranja. Ar/CO₂ mješavine do 18 % CO₂ podržavaju također način prijenosa metala impulsnim strujama. Prijenos metala kratkim spojevima je metoda prijenosa metala s niskim unosom topline te se za nju koriste mješavine s udjelom ugljičnog dioksida jednakim ili većim od 20 %. Kod primjene kratkih spojeva zahtijeva se opreznost ako se upotrebljavaju veće količine argona [15].

5.1.3. Prednosti i nedostaci MIG/MAG postupka

Zavarivanje MIG/MAG postupkom ima široke mogućnosti primjene: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja većine metalnih materijala. Ima prednost pred ručnim elektrolučnim zavarivanjem (REL) sa stajališta ekonomičnosti (više kilograma položenog materijala na sat, veća intermitencija pogona – nema zastoja za izmjenu elektroda kao kod REL postupka, manje čišćenje zavara). Primjenjuje se za zavarivanje limova i cijevi debljine od 1 mm obično do debljine 20 mm (u nekim slučajevima i daleko iznad tih debljina, kada je ekonomski i tehnološki opravdana primjena MAG postupka [13].

Prednosti [14]:

- Velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala
- Zavarivanje u svim položajima
- Zavarivanje u radionici i na terenu
- Mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- Mogućnost primjene praškom punjene žice
- Široki raspon debljina
- Velika učinkovitost i proizvodnost
- Pogodan za automatizaciju
- Moguća primjena i za lemljenje
- Bez troske

Nedostaci [14]:

- Kod rada na terenu moguće greške zbog loše zaštite-vjetar!
- Problemi kod dovođenja žice
- Veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost)
- Štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potreba za naknadnom obradom!)
- Složeniji uređaji (dovođenje žice, automatska regulacija)

5.1.4. Zavarivanje inconela 625 MIG/MAG postupkom

MIG/MAG postupak zavarivanja pogodan je za navarivanje a ujedno je i cijena samog uređaja niža u usporedbi s plazma uređajem. Količina nataljenog materijala višestruko je veća u odnosu na TIG i plazma postupke zavarivanja, te je zavarivaču mnogo lakše upravljanje gorionikom. Međutim u odnosu na TIG postupak zavarivanja mnogo je veće miješanje osnovnog i dodatnog materijala što povisuje postotak željeza u navarenom sloju. Prilikom zavarivanja ovisno o debljini osnovnog materijala moguća je uporaba prijenosa materijala kratkom spojevima ($I = 170 \text{ A}$, $U = 22 \text{ V}$), zavarivanje štrcajućim lukom ($I = 240 \text{ A}$, $U = 26 \text{ V}$, $v = 230 \text{ mm/min}$, veličina slobodnog kraja žice 15 mm). Za navarivanje MAG postupkom preporučljivo je provoditi u zaštiti mješavine plinova Argona i Helija te Inconel 625 elektrode u vidu dodatnog materijala debljine oko $1,2 \text{ mm}$. Nadalje preporučljivo je držati međuprolaznu temperaturu nižom $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ kako bi se smanjila zaostala naprezanja. Na kvalitetu zava direktno utječu parametri zavarivanja kao što su napon, struja, visina luka.

Prilikom navarivanja probleme može stvarati viskoznost taljevine. Međutim viskoznost taljevine zava ovisi o vrsti zaštitnog plina kako će biti kasnije u tekstu objašnjeno [20].

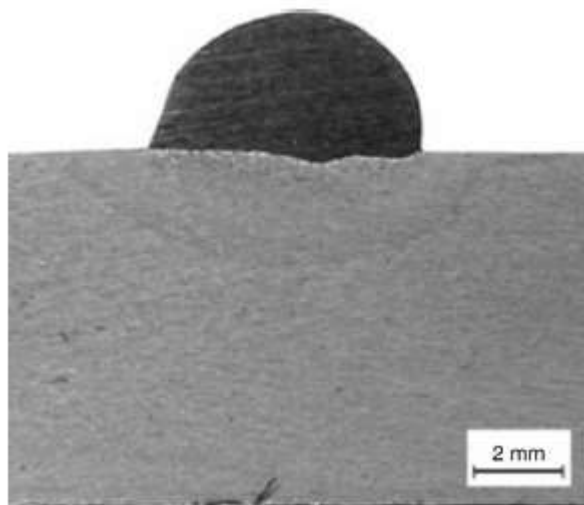
5.1.4.1. Utjecaj zaštitnih plinova na navarivanje Inconela 625 MIG/MAG postupkom

Kao zaštitni plinovi za navarivanje Inconela 625 MAG postupkom koriste se dvokomponentne mješavine plinova Ar/CO_2 ili Ar/O_2 te trokomponentne mješavine plinova $\text{Ar}/\text{He}/\text{O}_2$. Dvo - komponentne mješavine plinova bazirane na argonu koriste se zbog njihovog utjecaja na viskoznost taline zava. Prisutnost kisika u mješavini bilo u svom čistom (O_2) stanju ili vezanog u molekuli CO_2 smanjuje površinsku napetost taline zava te povećava viskoznost taline.

Izbor trokomponentne mješavine ($\text{Ar}/\text{He}/\text{O}_2$) u kojoj kisik zauzima od $1 - 3 \%$ kako bi se smanjio efekt oksidacije. Postotak helija povećan je u jednakom postotku ili do granice od 20% kako se argonom ne bi utjecalo na geometriju zava. Prisustvo helija u mješavini povećava intenzitet električnog luka i toplinsku provodnost što rezultira širim električnim lukom i višim porastom temperature u odnosu na zaštitni plin argon [8, 20].

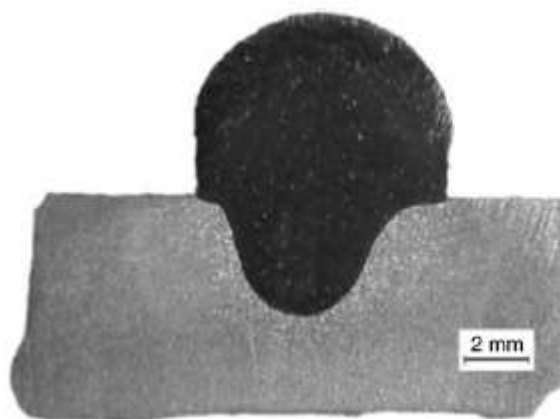
Zavarivanjem načinom prijenosa metala kratkim spojevima unatoč stabilnom prijenosu i neznatnom prskanju u zaštitnoj mješavini plina argona rezultira slabo viskoznom talinom bez obzira na odabranu struju zavarivanja. Smanjenjem brzine zavarivanja ispod 3.3 mm/s i njihanjem gorionika kako bi se talina bolje razlila po površini obratka ne daje efekta u smislu veće viskoznosti taline.

Korištenjem impulsnog načina prijenosa metala ne dolazi do smanjenja viskoznosti taline čak i koristeći parametre kao naprimjer 300 A / 4 mm/s ili 400 A / 2.8 mm/s talina pokazuje slabu viskoznost. Mnogo prihvatljivija viskoznost ostvaruje se uporabom štrcajućeg luka pri visokoj struji zavarivanja pri čemu se talina prihvatljivo razlijeva po površini obratka. Međutim jakost struje u od 200 A ograničena je zavarivanjem u PA položaju zavarivanja i velikom debljinom obratka. Zadovoljavanjem spomenutih uvjeta zbog debljine materijala neovisno o visini unesene energije ne dolazi do boljeg razlijevanja taline po obratku kao sto je prikazano na slici 14.



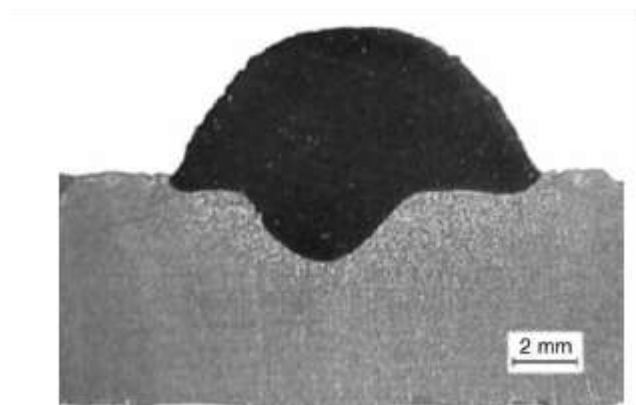
Slika 14. Navaren sloj Inconela 625 u zaštiti plina Argona [20]

Uporabom mješavine plinova s dodatkom CO₂ od 5-15 % ne ostvaruju se znatno bolji rezultati glede viskoznosti i geometrije zavara te stabilnosti električnog luka (slika 15).



Slika 15. Navaren sloj Inconela 625 u zaštiti mješavine plinova 15 % CO₂ i Ar [20]

Povoljni rezultati ostvaruju se uporabom mješavine plinova argona i CO₂ u omjeru 75 % Ar i 25 % CO₂ s impulsnom strujom zavarivanja pri čemu su postignuti zadovoljavajući rezultati kao što je prikazano na (slici 16).



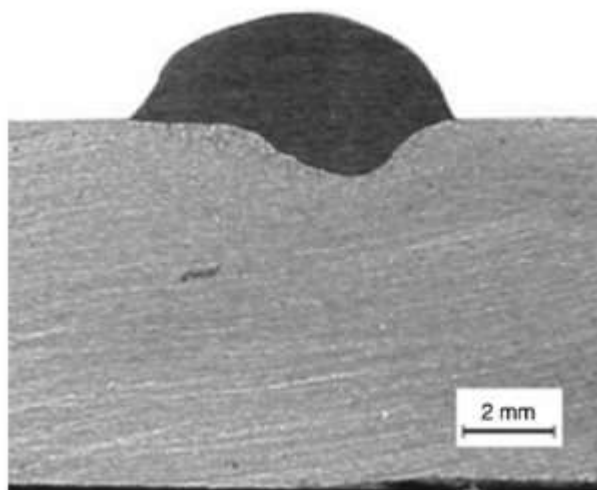
Slika 16. Navaren sloj Inconela 625 u zaštiti mješavine plinova 15 % CO₂ i Ar korištenjem impulsnog luka [20]

Uporabom načina prijenosa metala kratkim spojevima ne postižu se zadovoljavajući rezultati u vidu viskoznosti taline.

Mješavinom plinova argona i kisika s udjelom kisika od 25 % povoljno utječe na viskoznost taline u pogledu livljivosti međutim loše utječe na prijenos metala. Kod zavarivanja s impulsnim strujama u zaštitnoj mješavini plinova argona i kisika s udjelom kisika od 25 % dolazi do odvajanja više od jedne kapljice dodatnog materijala po impulsu ili prekomjerno velikog rasta kapljice dodatnog materijala prije odvajanja. Na taj način u oba slučaja rastaljeni metal završava izvan električnog luka te nastaje troska. Promjenom parametara struje zavarivanja ne može se utjecati na gore spomenuti problem.

Uporabom trokomponentnog zaštitnog plina kod navarivanja legure Inconela 625 prijenosom metala kratkim spojevima neovisno o udjelima kisika i helija u mješavini zaštitnog plina ne ostvaruje se poboljšanje viskoznosti taline i geometrije zavora u odnosu na dvokomponentne mješavine.

Međutim zavarivanjem impulsnim strujama i korištenjem trokomponentnog zaštitnog plina Ar/He/O₂ značajno se poboljšava viskozitet taline u smislu boljeg tečenja i u konačnici nižeg i šireg zavora kao što je prikazano na slici 17 [8, 20].



Slika 17. Navaren sloj Inconela 625 u zaštiti mješavine plinova 79 % Ar / 20 % He / 1 % O₂ korištenjem impulsnog luka [20]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada obrađena je analiza zavarljivosti Inconela 625. Svrha istraživanja određivanje je kritičnih vrijednosti parametara sa stanovišta nastanka toplih pukotina s obzirom na količinu unesene energije i stupanj miješanja.

Postupak analize zavarljivosti proveden je prema normi EN ISO TR 17641 – 3 - 2003 Vareststraint metodom kako bi se utvrdila mogućnost nastajanja solidifikacijskih i likvacijskih pukotina pomoću kojih se može dati kvantitativna ocjena zavarljivosti legure.

Istraživanje se sastoji od ispitivanja zavarljivosti Vareststraint metodom, te obrade i komentiranja dobivenih rezultata. Ispitivanje je podijeljeno u dva slučaja s istim dodatnim i osnovnim materijalom i jednakim parametrima zavarivanja ali uporabom dvaju različitih zaštitnih plinova kako bi se utvrdio utjecaj količine unesene energije i zaštitnog plina.

6.1. Osnovni materijal

Za osnovni materijal odabran je opći konstrukcijski čelik S355J2 kemijskog sastava prikazanog u tablici.. Iz osnovnog materijala napravljeni su uzorci dimenzija 250 mm × 50 mm × 3 mm. Čelik S 355 često se koristi zbog svoje odlične zavarljivosti i boljih mehaničkih svojstava u odnosu na čelik S235. Isporučuje se u toplo valjanom i hladno vučenom stanju. Široko se upotrebljava za izradu raznih konstrukcija i brodograđevnoj industriji [21].

- S – oznaka za konstrukcijski čelik
- 355 – granica tečenja (Re)
- J – minimalni udarni rad loma 27 J
- 2 – temperatura ispitivanja -20 °C

Očvrsnuće čelika S355J2 toplinskom obradom nije preporučljivo. U slučaju provođenja toplinske obrade faktori kao što su najviša temperatura zagrijavanja, brzina zagrijavanja i hlađenja te vrijeme držanja ovisni su o obliku i dimenzijama profila.

Navedeni čelik karakterizira minimalna granica razvlačenja od 355 N/mm pri debljinama manjim od 16 mm te vlačne čvrstoće 510 Mpa do 680 Mpa pri debljini materijala od 3 mm. Kemijski sastav dan je u tablici 2 [22, 23].

Tablica 2. Kemijski sastav čelika S355J2 prema HRN EN 10028-2:2004. [24]

C % max.	Si % max.	Mn% max.	P% max.	S% max.	Cu% max.
0,20	0,55	1,60	0,025	0,025	0,55

6.2. Dodatni materijal

Dodatni materijal je u obliku žice od Inconela 625 trgovačkog naziva „DAIKO SF 625“, kemijski sastav žice dan je u tablici 3.

Prema navodima proizvođača dodatni materijal se može primjenjivati na radnim temperaturama od -269 °C do iznad 1000 ° C. Pogodan je za zavarivanje visokotemperaturno otpornih legura kao što je Inconel 601 te ostalih legura za primjenu u farmaceutskoj i petrokemijskoj industriji osim u primjenama izloženim visokoj koncentraciji sulfida.

Jednako tako pogodan je za navarivanje u brodograđevnoj i offshore industriji za navarivanje ventila, crpki i vratila te u primjenama gdje je potrebna visoka otpornost na rupičastu koroziju (PRE = 50). Tablicom 4 prikazana su mehanička svojstva dodatnog materijala.

Tablica 3. Kemijski sastav dodatnog materijala

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cr %	Ni %	Mo %	Nb+Ta %	Cu %	Al %	Ti %	Fe %
0,02	0,02	0,10	0,005	0,005	22,0	65,0	9,0	3,50	0,05	0,20	0,20	<0,5

Tablica 4. Mehanička svojstva dodatnog materijala

Vlačna čvrstoća $R_m(N/mm^2)$	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}(N/mm^2)$	Udarni rad loma (-196 °C) (J)	Tvrdoća zavora HV
750	500	80	250

6.3. Oprema za zavarivanje

6.3.1. Izvor struje

Za izvor struje zavarivanja odabran je uređaj za zavarivanje MIG/MAG postupkom proizvođača Daihen-Varstroj „Welbee Inverter P400“ prikazan na slici 18. Tehničke karakteristike uređaja dane su u tablici 5.

Tablica 5. Karakteristike izvora struje za zavarivanje

Broj faza	3
Nazivni ulazni napon (V)	400 +/- 15 %
Radna frekvencija uređaja (Hz)	50/60
Najveći ulazni napon (V)	400
Ulazna snaga (kW)	17,4
Maksimalna struja zavarivanja (A)	400
Najveći napon zavarivanja (V)	34
Raspon struje zavarivanja (A)	30 – 400
Raspon napona zavarivanja (V)	12 - 34
Napon praznog hoda (V)	80
Nazivni radni ciklus (%)	50
Masa (kg)	62
Dimenzije V/D/Š (mm)	592 / 710 / 395
Statička karakteristika	CV



Slika 18. Izvor struje za zavarivanje

6.3.2. Sustav za automatizirano vođenje gorionika

Sustav za automatizirano vođenje gorionika naziva „BUGO Systems“ sastoji se od šina i traktora na kojeg je pričvršćen gorionik (slika 19). Sustav omogućuje podešavanje brzine zavarivanja, nagiba gorionika i udaljenost gorionika od radnog komada. Automatizirano zavarivanje ostvaruje se gibanjem traktora po šinama paralelno radnom komadu.

Uporabom sustava za automatizirano vođenje gorionika ostvaruje se kontinuirani zavareni spoj jednakih parametara glede brzine zavarivanja, udaljenosti i kuta nagiba gorionika. Navedeni sustav korišten je kako bi se eliminirao utjecaj zavarivača te kako bi svi zavari bili jednako izvedeni tj. kako bi se što više osigurala preciznost i ponovljivost zavarivanja.



Slika 19. „Bugo“ sustav za automatizaciju MIG/MAG zavarivanja

6.4. Varestraint metoda

Varestraint metodom ispituje se osjetljivost materijala na pojavu toplih pukotina. Ispitivanje se provodi kako bi se odredili kritični parametri i mogućnost pojave toplih pukotina. Varestrain metodom moguće je utvrditi sklonost materijala nastajanju tipovima toplih pukotina kao što su solidifikacijske, likvacijske i pukotine nastale padom istezljivosti materijala. U tablicom 6 prikazan je način obrađivanja rezultata ispitivanja. Prilikom ispitivanja osnovnog materijala na sklonost nastajanju toplih pukotina prema normi EN ISO TR 17641 – 3 – 2003 potrebno je zavarivanje provoditi TIG postupkom.

Veličina uzorka nije strogo definirana te ovisi o dostupnosti materijala koji se ispituje, točnosti ispitivanja i veličini i mogućnostima ispitnog uređaja.

Najprikladnije veličine uzoraka su duljine između 80 mm i 300 mm te širine između 40 mm i 100 mm. Debljina uzoraka ovisi o dostupnoj debljini materijala koji se ispituje i mogućnostima uređaja za ispitivanje.

Tablica 6. Način obrađivanja rezultata ispitivanja

Vrsta ispitivanja	Vrsta nastalih pukotina	Rezultati testa	Primjena testa
Varestraint	Solidifikacijske	Duljina nastalih pukotina (mm)	Osnovni materijal
	Likvacijske		Dodatni materijal
	Pukotine nastale uslijed pada istezljivosti		Tehnologija zavarivanja

6.4.1. Provedba ispitivanja

Parametri zavarivanja nisu strogo određeni te se mogu odabrati tako da odgovaraju parametrima u određenim primjenama.

Preporučeni parametri su:

- Nizak unos topline: 12,5 V, 85 A, 18 cm/min
- Visok unos topline: 13,5 V, 220 A, 11 cm/min

Tijekom zavarivanja potrebno je očitati i zabilježiti parametre. Test je potrebno provesti TIG postupkom zavarivanja po središnjoj liniji uzorka. Test se provodi tako da se istodobno prilikom zavarivanja uzorka pod utjecajem sile F uzduž smjera zavora uzorak deformira po polumjeru zakrivljenosti probe. Kao vanjska sila najčešće se upotrebljava hidraulična preša s mogućnošću podešavanja brzine gibanja stapa. Pri izvođenju testa prema normi EN ISO TR 17641 – 3 - 2003 brzina gibanja stapa minimalno mora iznositi 18 mm/s.

6.4.2. Rezultati testa

Nakon provedbe ispitivanja potrebno je uzorke vizualno pregledati s uvećanjem $\times 25$ kako bi se utvrdilo da li je materijal sklon nastajanju toplih pukotina. Nakon uočavanja pukotina potrebno je izmjeriti i zabilježiti dužinu koja je nastala kao funkcija savijanja uzorka. Relativan položaj pukotine i radius zakrivljenja ispitnog uzorka daje procjenu podložnosti materijala na tople pukotine.

6.5. Opis postupka analize zavarljivosti

Ispitivanje se sastoji od dva (A i B) slučaja na ukupno deset uzoraka uz jednake parametre (struja, napon, visina slobodnog kraja žice, brzina zavarivanja, protok plina) ali u zaštitnoj atmosferi dvaju različitih plinova. U prvom slučaju (A) u zaštiti mješavine plinova argona i ugljičnog dioksida (CO_2) trgovačkog naziva Inoxline C₂ proizvođača „Messer“ (slika 20), a u drugom slučaju (B) u zaštiti inertnog plina argona istog proizvođača. Zaštitna mješavina plinova upotrebljena u prvom slučaju, mješavina je s 97,5 % argona i 2,5 % ugljičnog dioksida (CO_2).



Slika 20. Mješavina zaštitnog plina Ar 75,5 % i CO_2 2,5 %

Prije samog postupka provođenja navarivanja bilo je potrebno odmastiti i očistiti uzorke do metalnog sjaja kako bi se što više spriječila pojava nečistoća u zavarenom spoju. Nakon čišćenja uzoraka sljedilo je označavanje središnje linije uzorka zbog lakšeg centriranja i vođenje gorionika.

Uređaj za Varestraint test sastoji se od postolja, pneumatskog cilindra, alata za savijanje, stezne naprave i sustava za podešavanje brzine kretanja stapa. Kako bi se izmjerio put stapa pneumatskog cilindra i podesila brzina savijanja koja prema normi EN ISO TR 17641 – 3 – 2003 mora minimalno iznositi 18 mm/s obavljena je proba uređaja bez uzorka. Probom je utvrđena duljina puta koji prijeđe stap te iznosi $s = 95 \text{ mm}$, a izmjereno vrijeme potrebno za prijelaz puta iznosi $t = 5 \text{ s}$. Jednostavnim matematičkim računom pomoću izraza (1) za računanje prijeđenog puta u jedinici vremena dobivena je brzina kretanja stapa iznosa $v = 19 \text{ mm/s}$ što zadovoljava uvjet norme.

$$v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

$$v = \frac{95}{5} = 19 \text{ mm/s} \quad (2)$$

Prethodno očišćen i označen uzorak postavljen je kako je prikazano na slici 21 u steznu napravu uređaja za Varestraint test.



Slika 21. Postavljanje uzorka u steznu napravu

Kritične vrijednosti parametara sa stanovišta nastanka toplih pukotina određene su postepenim povećanjem unosa energije tj. struje i napona uz konstantnu brzinu zavarivanja, protoka plina i duljinu slobodnog kraja žice. Za provedbu postupka zavarivanja unatoč normi odabran je MIG/MAG postupak zavarivanja. MIG/MAG postupak odabran je ponajviše zbog ponovljivosti i preciznosti izvođenja ispitivanja, te široke uporabe MIG/MAG postupka u navarivanju Inconela 625.

Budući da je parametre zavarivanja tek trebalo utvrditi (ponajprije jakost struje zavarivanja), iznos struje zavarivanja se mijenjao u granicama od 10 A kako bi se što točnije utvrdio kritičan iznos unosa topline za nastanak toplih pukotina.

Ispitivanje je proveden na načina da se uzorak tijekom samog postupka navarivanja dodatnog materijala Inconela 625 pomoću pneumatskog cilindra i poluge savijao po polumjeru alata za savijanje Vastrestraint uređaja (slika 22). Zavari su se izvodili ukupne dužine 150 mm. Preša za savijanje uzoraka uključivala se nakon 120 mm dužine zavara kako bi se što više održala konstantnom duljina slobodnog kraja žice. Tijekom zavarivanja praćeni su i bilježeni

parametri (struju i napon) zavarivanja navedeni u tablici 7 za prvi slučaj A i tablici 8 za drugi slučaj B. Količina unesene energije izračunata je prema normi HRN EN 1011 – 1:1998 pomoću izraza (2).



Slika 22. Uređaj za Varestraint

$$Q = k \frac{U \times I}{v} \times \frac{60}{1000}, \quad \frac{kJ}{mm} \quad (2)$$

- U – napon zavarivanja [V]
- I – jakost struje zavarivanja [A]
- v_z – brzina zavarivanja [mm/min]
- k – stupanj iskoristivosti pojedinog postupka (za MIG/MAG postupak zavarivanja prema normi HRN EN 1011 – 1 iznosi 0,8)
- Q – Unos topline [kJ/mm]

Tablica 7. Vrijednosti parametara ispitnih uzoraka slučaja A

Parametri	Uzorak 1A	Uzorak 2A	Uzorak 3A	Uzorak 4A	Uzorak 5A
Postupak zavarivanja	135 MAG	135 MAG	135 MAG	135 MAG	135 MAG
Dodatni materijal	Inconel 625	Inconel 625	Inconel 625	Inconel 625	Inconel 625
Debljina dodatnog materijala (d , mm)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Vrsta struje i polaritet	DC pulse + pol	DC pulse + pol	DC pulse + pol	DC pulse + pol	DC pulse + pol
Jakost struje (I , A)	126	94	105	114	84
Visina napona (U , V)	22,3	21,2	21,9	22,2	21
Vrsta plina	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar
Protok plina (V , l/min)	18	18	18	18	18
Duljina slobodnog kraja žice (l , mm)	14	14	14	14	14
Brzina zavarivanja (v_z , cm/min)	29	29	29	29	29
Unos topline (Q , kJ/mm)	0,445	0,329	0,38	0,418	0,291

Tablica 8. Vrijednosti parametara ispitnih uzoraka slučaja B

Parametri	Uzorak 1B	Uzorak 2B	Uzorak 3B	Uzorak 4B	Uzorak 5B
Postupak zavarivanja	131 MIG	131 MIG	131 MIG	131 MIG	131 MIG
Dodatni materijal	Inconel 625	Inconel 625	Inconel 625	Inconel 625	Inconel 625
Debljina dodatnog materijala (d , mm)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Vrsta struje i polaritet	DC pulse + pol	DC pulse + pol	DC pulse + pol	DC pulse + pol	DC pulse + pol
Jakost struje (I , A)	84	95	105	118	125
Visina napona (U , V)	22	21,3	22,1	21,3	22,4
Vrsta plina	Ar 97,5%+CO 2 2,5%	Ar 97,5%+C O ₂ 2,5%	Ar 97,5%+C O ₂ 2,5%	Ar 97,5%+C O ₂ 2,5%	Ar 97,5%+C O ₂ 2,5%
Protok plina (V,l/min)	18	18	18	18	18
Duljina slobodnog kraja žice (l , mm)	14	14	14	14	14
Brzina zavarivanja (v_z , cm/min)	29	29	29	29	29
Unos topline (Q , kJ/mm)	0,306	0,334	0,384	0,416	0,463

6.6. Dobiveni rezultati

6.6.1. Slučaj A (mješavina plinova Ar 97,5 % i CO₂ 2,5 %)

Nakon zavarivanja uzorci su pregledani te su vizualnom kontrolom u slučaju A (mješavina plinova Ar 97,5 % i CO₂ 2,5 %) utvrđene tople pukotine na tri od pet uzoraka (slika 23), dok su dva uzorka bez vizualno vidljivih pukotina kao što je vidljivo sa slike 24.



Slika 23. Uzorci slučaja A nakon ispitivanja



Slika 24. Uzorci slučaja A bez vidljivih pukotina

6.6.2. Slučaj B

Na uzorcima u slučaju B (zavarivanje provedeno u zaštiti plina argona), kao što je prikazano slikom 25, utvrđene su tople pukotine na svim ispitnim uzorcima.

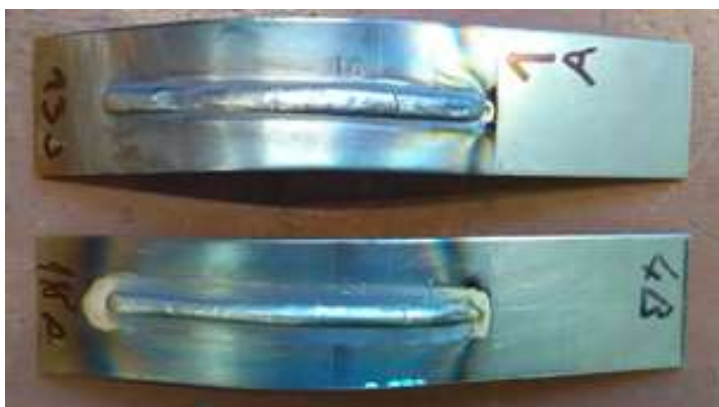


Slika 25. Uzorci slučaja B nakon ispitivanja

Zbog niske energije navarivanja kojoj je uzrok niska toplinska vodljivost argona u odnosu na mješavinu plinova Ar i CO₂ na uzorku 1B vidljivo je naljepljivanje dodatnog materijala.

Nastale pukotine pojavile su se na zavarima što sugerira na kristalizacijsku vrstu toplih pukotina. S obzirom na parametre zavarivanja u oba slučaja (A i B) s povećanjem struje zavarivanja tj. većim unosom energije, a ujedno i većom količinom nataljenog materijala pukotine su postajale veće.

Nakon vizualne kontrole metalnom četkom od nehrđajućeg čelika uklonjeni su oksidi s površina uzoraka, kao što je prikazano na slici 26. Uklanjanje oksida bilo je potrebno kako bi se ispitni uzorci mogli podvrgnut ispitivanju kemijskog sastava zavara.



Slika 26. Uzorci nakon uklanjanja oksida

6.6.3. Kemijski sastav zavara

Kemijska analiza uzoraka rađena je kako bi se utvrdio stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala. Kemijski sastav zavara izmjeren je XRF (rentgenska fluorescentna analiza) uređajem „Olympus Innov-X DELTA Premium XRF“ za mjerenje kemijskog sastava materijala prikazanog na slici 27, u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uređaj XRF služi za nerazorna ispitivanja kemijskog sastava

materijala te se odlikuje brzinom i jednostavnošću mjerenja te prikaza izmjerenih podataka. Izmjereni podaci prikazani su u tablici 9. Radi lakšeg snalaženja jednakim bojama označene su vrijednosti primjene jednakih parametara zavarivanja.

Tablica 9. Kemijski sastav ispitnih uzoraka

UZORAK	P (%)	Si (%)	S (%)	Al (%)	Co (%)	Mn (%)	Ti (%)	Cr (%)	Fe (%)	Ni (%)	Nb (%)	Cu (%)	Mo (%)
1A	0,099	0,11	0,3	6,83	0,43	-	0,2	10,26	42,72	31,17	1,88	0,21	3,99
2A	0,089	-	0,33	10,14	0,38	0,15	2,03	10,15	40,1	31	1,67	0,27	3,69
3A	0,172	0,13	0,59	7,82	0,50	0,29	3,09	12,85	35,58	31,84	2,22	0,26	4,65
4A	0,164	0,22	0,56	5,80	0,41	0,23	2,18	12,30	39,68	31,43	2,28	0,26	4,49
5A	0,089	-	-	8,89	-	0,21	2,5	13,75	29,08	37,59	2,33	0,4	5,16
1B	0,056	0,31	-	-	-	0,13	0,17	7,5	46,83	39,94	1,56	-	3,51
2B	0,075	0,14	0,20	-	-	-	0,26	12,30	30,35	49,09	2,18	0,33	5,06
3B	0,067	-	-	-	-	-	0,35	10,13	38,32	44,70	2,01	-	4,43
4B	-	0,15	0,68	-	-	0,18	0,68	16,11	22,91	49,47	2,84	0,38	6,60
5B	-	-	0,56	-	-	-	0,46	17,96	21,13	49,22	3,05	0,41	7,22



Slika 27. XRF uređaj za ispitivanje kemijskog sastava materijala

Analizom je utvrđeno da uporabom argona (slučaj B) zavar sadrži veći postotak nikla u odnosu na slučaj A gdje je upotrebljena mješavina zaštitnih plinova. Veći postotak nikla posljedica je niže toplinske vodljivost zaštitnog plina argona u odnosu na mješavinu zaštitnih plinova. Iz tablice je vidljivo prema postotku željeza da višim unosom topline dolazi do većeg stupnja miješanja dodatnog i osnovnog materijala.

Na uzorcima 2A i 5A vizualnom kontrolom nije utvrđeno nastajanje toplih pukotina. U odnosu na uzorke 4B i 5B koji su zavarivani jednakim parametrima ali pod zaštitom plina argona pojavio se manji postotak nečistoća i elemenata sklonim nastajanju toplih pukotina (Si, S i Cr). Niži postotak nečistoća posljedica je uporabe mješavine plinova Ar i CO₂ budući da CO₂ smanjuje površinsku napetost te povećava viskoznost taline što omogućuje lakše

izlaženje nečistoća na površinu zavora. U uzorcima na kojima nema indikacija za nastajanje toplih pukotina (uzorci 2A i 5A) mnogo je veći postotak elemenata koji sprječavaju nastajanje toplih pukotina (Al, Ti, Mn, Ti).

6.7. Makro izbrusci i geometrija zavora

Makro izbrusci napravljeni su kako bi se vidjela dubina penetracije i postignuta geometrija zavora s obzirom na parametre zavarivanja prije svega odabranu struju zavarivanja i zaštitni plin. Uzorci su izrezani na tračnoj pili u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje kako je prikazano na slici 28.



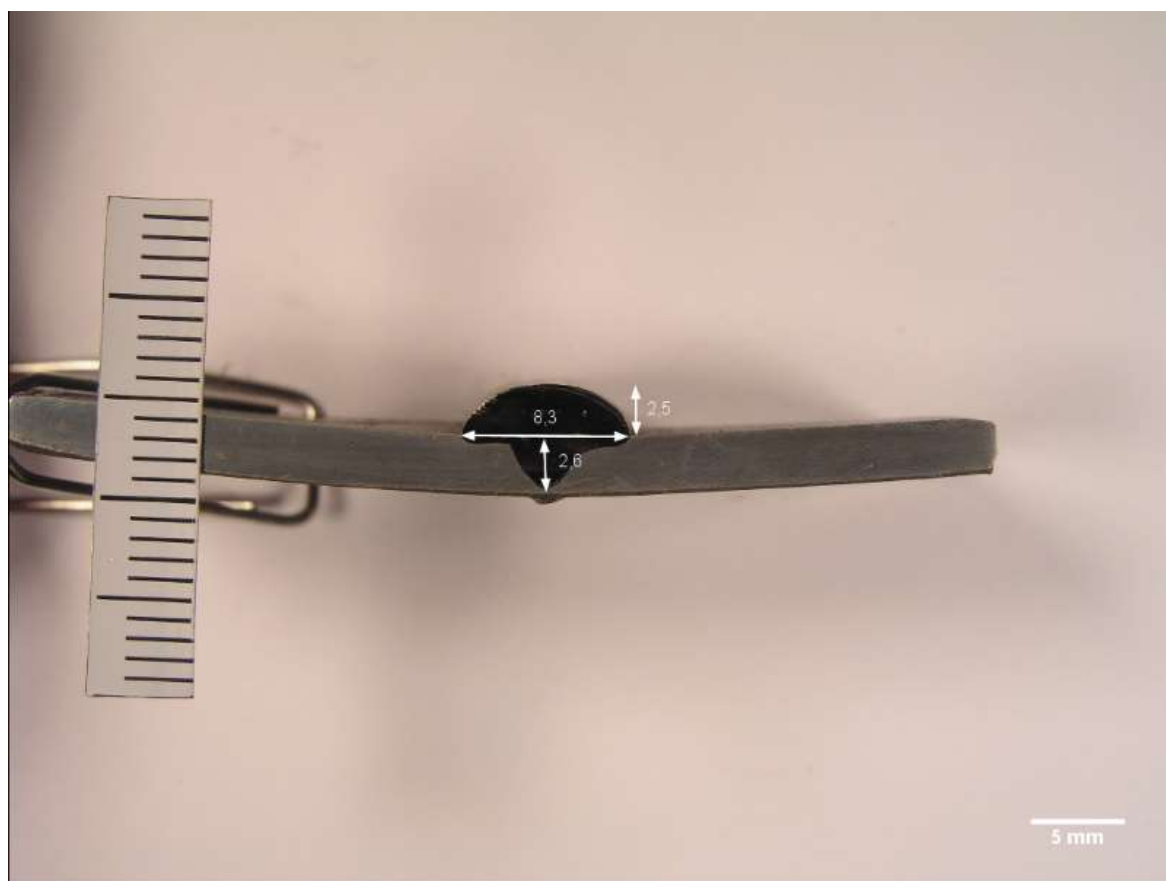
Slika 28. Izrezivanje uzoraka

Nakon izrezivanja, uzorci su izbrušeni te pripremljeni za izradu makro izbrusaka (slika 29).



Slika 29. Izbrušeni uzorci

Geometrija navara izmjerena je i kotirana na slikama makro izbrusaka pomoću programa ImageJ kako je prikazano (slika 30 – 39). Prema izmjerenim vrijednostima geometrije navara zaključuje se kako je uporabom mješavine plinova Ar 97,5 % i CO₂ 2,5 % postignuta veća penetracija u osnovni materijal s jednakim parametrima što je posljedica veće toplinske vodljivosti CO₂ u odnosu na zaštitni plin argon. Uslijed prevelikog unosa topline na uzorcima 1A, 3A, 5A došlo je do pregaranja kao što je prikazano slikama (slika 30, slika 32, slika 33). Na uzorcima 2A i 5A (slika 31, slika 34) postignuta je zadovoljavajuća penetracija i geometrija navara.

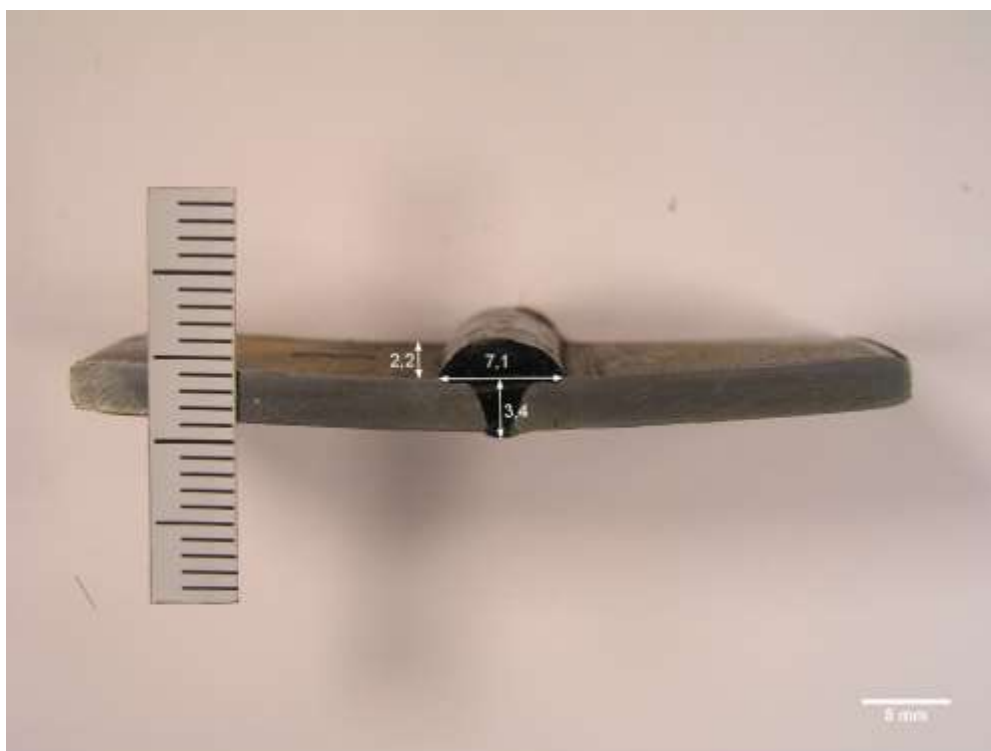


Slika 30. Uzorak 1A

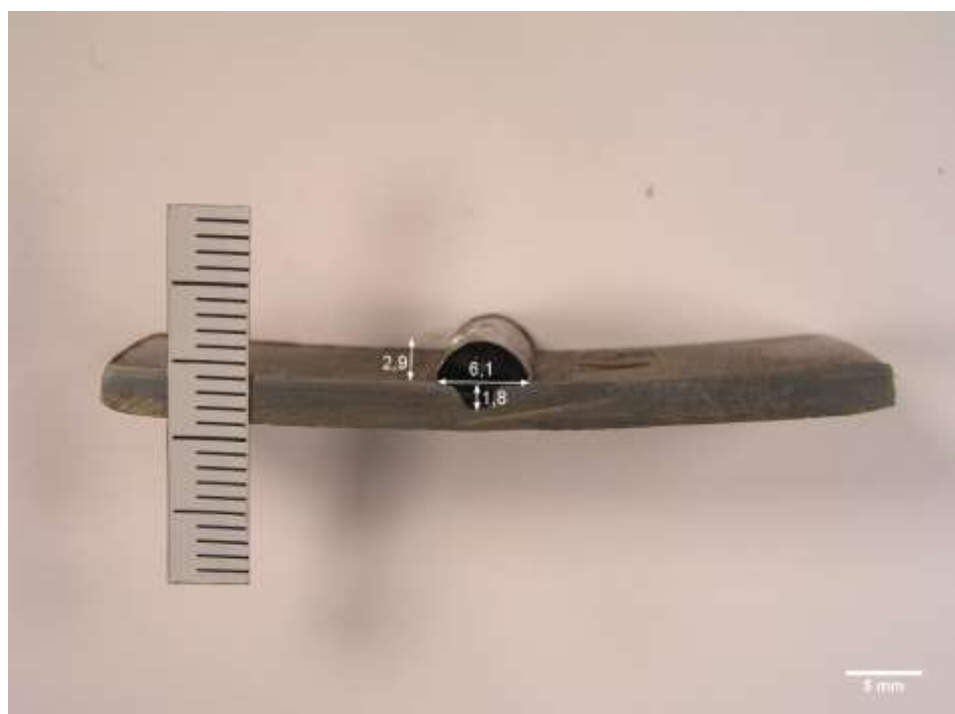
Na uzorku 2A uporabom parametara $I = 94 \text{ A}$, $U = 21,2 \text{ V}$, $v_z = 29 \text{ cm/min}$ postignuta je zadovoljavajuća geometrija navara i penetracija u osnovni materijal te nema pojave toplih pukotina.



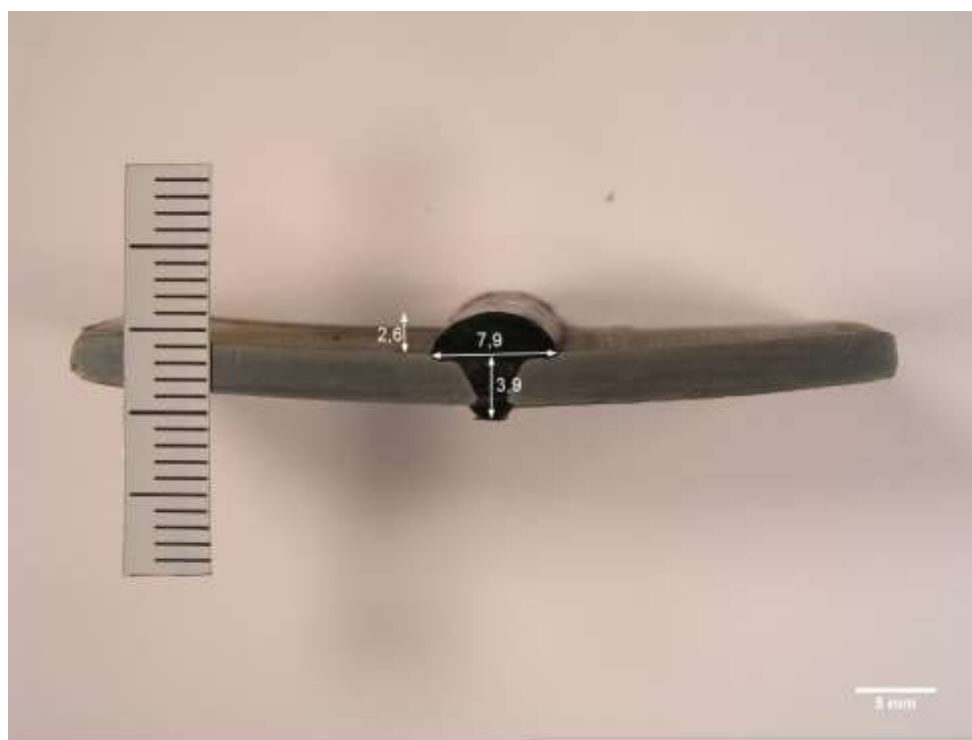
Slika 31. Uzorak 2A



Slika 32. Uzorak 3A

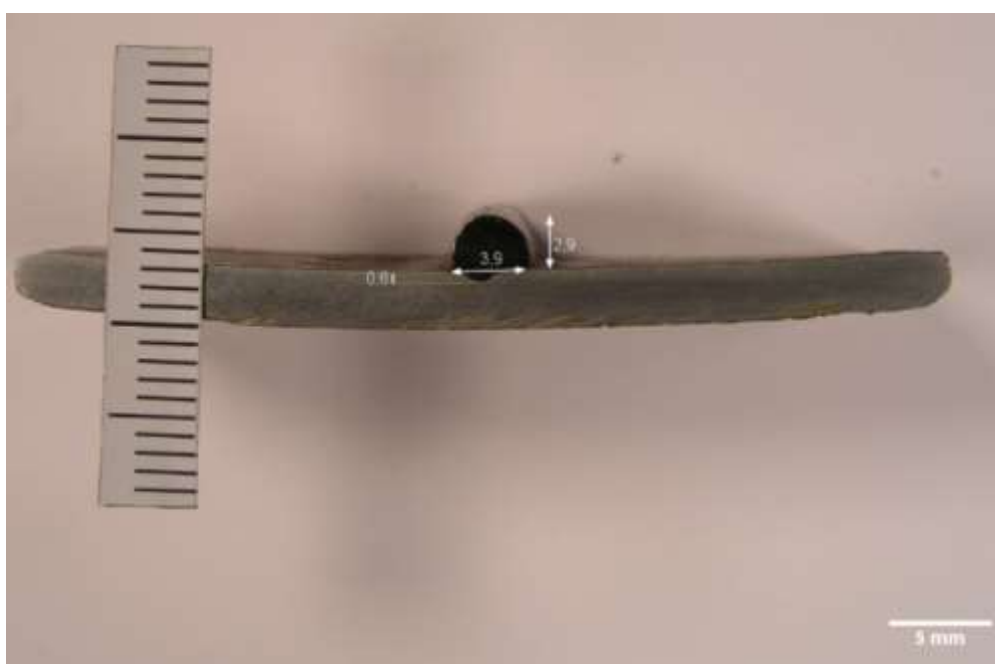


Slika 33. Uzorak 4A

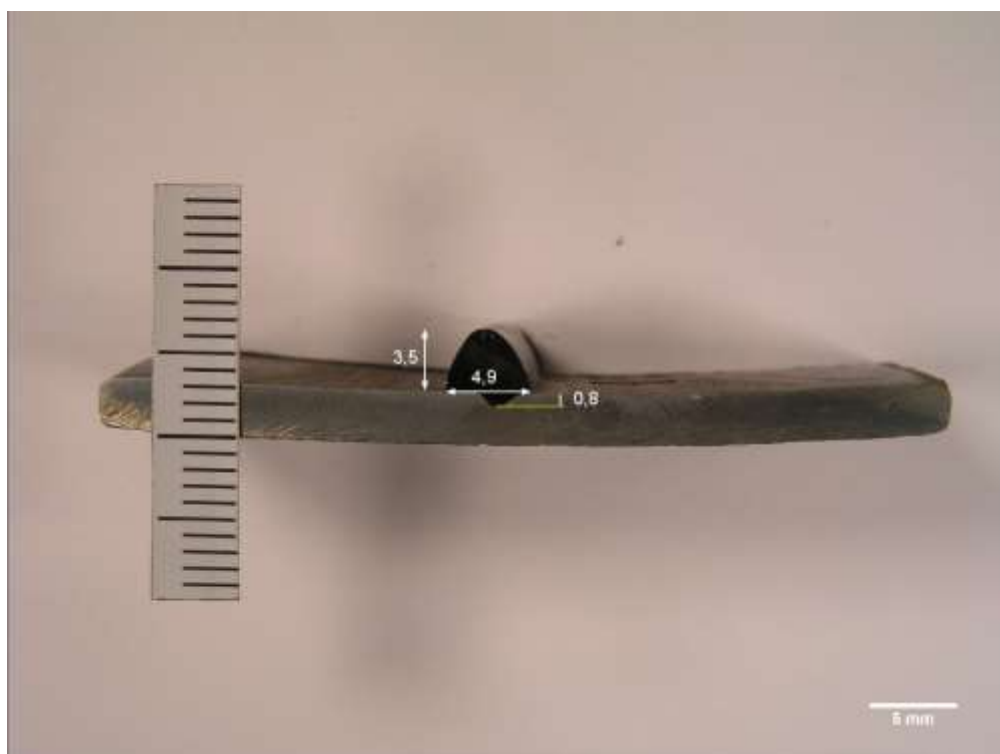


Slika 34. Uzorak 5A

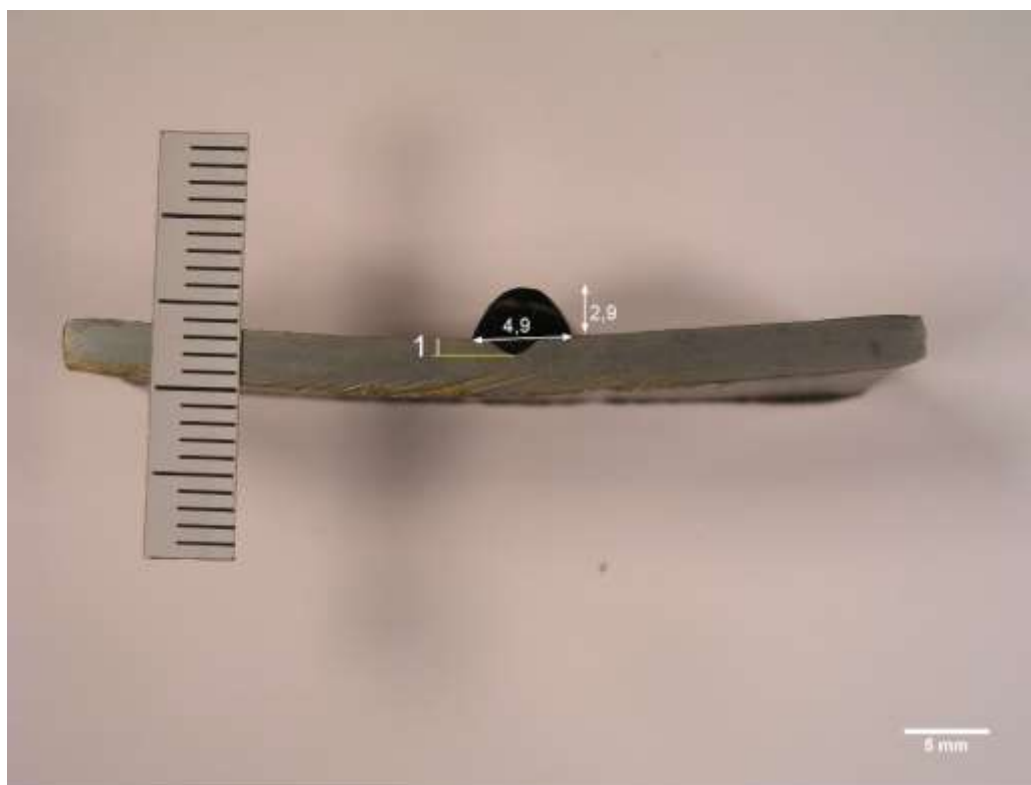
U slučaju B uporabom zaštitnog plina argona navarivanjem s jednakim parametrima kao u slučaju A postignuta je manje penetracije i velika nadvišenja, što je posljedica niže toplinske vodljivosti čistog plina argona u odnosu na mješavinu. Na uzorku 4B (slika 38) i uzorku 5B (slika 39) nije došlo do pregaranja kao u slučaju A, te je postignuta zadovoljavajuća geometrija zavara.



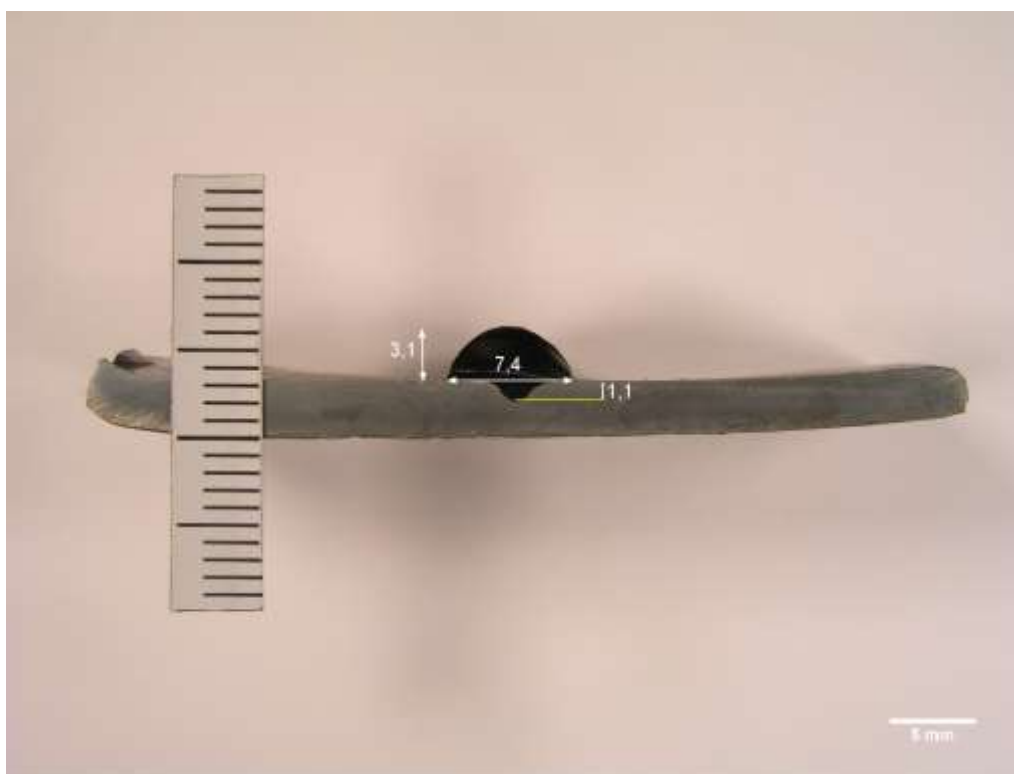
Slika 35. Uzorak 1B



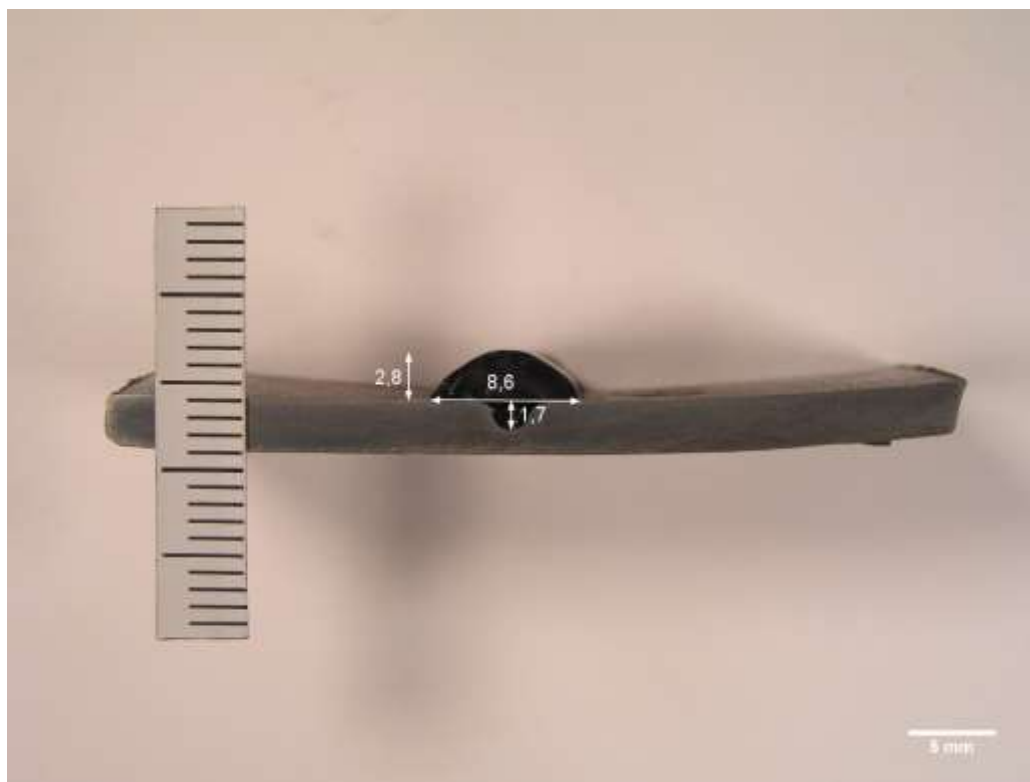
Slika 36. Uzorak 2B



Slika 37. Uzorak 3B



Slika 38. Uzorak 4B



Slika 39. Uzorak 5B

7. ZAKLJUČAK

Analizom zavarljivosti Inconela 625 Varestraint metodom utvrđen je veliki utjecaj i malog postotka CO₂ u mješavini zaštitnog plina. Svi uzorci ispitivani su jednakom kombinacijom parametrima (struja zavarivanja, napon, brzina zavarivanja, protok plina, dužina slobodnog kraja žice), ali pod zaštitnom atmosferom dvaju različitih plinova. U slučaju A na pet uzoraka korištena je mješavina zaštitnih plinova 97,5 % argona i 2,5 % ugljičnog dioksida, dok je u drugom slučaju B korišten 100% Argon. Nakon provedbe testa zavarljivosti Varestraint metodom vizualnom kontrolom utvrđene su tople pukotine na tri uzorka od ukupno pet u slučaju A, dok su se u drugom slučaju B pojavile pukotine na svih pet uzoraka. Kemijskom analizom utvrđena je veća stopa miješanja u slučaju A, što je posljedica većeg unosa topline uslijed prisustva CO₂ u mješavini zaštitnog plina. Kemijskom analizom u slučaju B utvrđena je veća količina nečistoća i kroma što je jedan od glavnih uzroka nastajanja toplih pukotina. Niži postotak nečistoća u slučaju A posljedica je uporabe mješavine plinova Ar i CO₂ budući da CO₂ smanjuje površinsku napetost te povećava viskoznost taline što omogućuje lakše izlaženje nečistoća na površinu zavara. Pregledom makro izbrusaka utvrđeno je veće razlijevanje taline uporabom mješavine plinova što pogoduje navarivanju Inconela 625.

Uzorci na kojima nema vidljivih toplih pukotina (uzorak 2A i 5A) zavarivani su parametrima:

- Struja zavarivanja uzorka 2A $I = 94 \text{ A}$
- Struja zavarivanja uzorka 5A $I = 84 \text{ A}$
- Napon zavarivanja uzorka 2A $U = 21,2 \text{ V}$
- Napon zavarivanja uzorka 5A $U = 21 \text{ V}$
- Protok zaštitnog plina 18 l/min
- Brzina zavarivanja 29 cm/min

Iz navedenih podataka zaključuje se da uporabom mješavine zaštitnog plina Ar 97,5 % i CO₂ 2,5 % i nabrojanim iznosom parametara navarivanjem Inconela 625 na konstrukcijski čelik S 355 postiže kontinuirani homogeni spoj tj. prihvatljiva zavarljivost.

LITERATURA

- [1] H. L. Eiselstein, D. J. Tillack: Inco Alloys International, Inc., *The Inovation and Definition of Alloy 625*, P. O. Box, Huntington, 1958.
- [2] <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf> 15.6.2017
- [3] Podloge iz kolegija: Zavarljivost materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015
- [4] I. Samardžić, Š. Klarić, B. Despotović, A. Kožul, V. Topić: *Analiza tehnološkiosti zavarenih konstrukcija*, Sveučilište J. J. Strossmayer u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu.
- [5] Arthur L. Philips.: *Welding Handbook*, New York, 2003.
- [6] <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2013/02/how-to-control-the-warping-of-parts-in-thin-sheet-metal/> 3.7.2017.
- [7] Podloge iz kolegija: Zavarljivost materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [8] <https://www.indiamart.com/proddetail/nickel-metal-3412767755.html>, 28.6.2017.
- [9] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/zavar/nikl.html> , 26.5.2017.
- [10] <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Documents/weldcracking.pdf>, 28.6.2017.
- [11] Indian Journal of Science and Technology, *Welding Parameters for Inconel 625 Overlay on Carbon Steel using GMAW*, November 2015.
- [12] <http://www.ceweld.com/en/content/welding-wire-inconel-625-600-825-etc> , 29.6.2017.
- [13] http://www.vdm-metals.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Data_Sheets/Data_Sheet_VDM_Alloy_625.pdf , 20.5.2017.
- [14] <http://haynesintl.com/docs/default-source/pdfs/new-alloy-brochures/high-temperature-alloys/brochures/625-brochure.pdf?sfvrsn=14> , 1.6.2017.
- [15] [http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf](http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf) 15.6.2017.
- [16] Podloge iz kolegija: Strojevi i oprema za zavarivanje, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

-
- [17] http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/mb_dipl1/toc2/2_3.pdf , 20.6.2017
- [18] http://lindeplin.hr/dat/shieldinggases_.pdf 28.6.2017.
- [19] http://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig4_10.htm 28.6.2017.
- [20] <http://www.tandfonline.com/loi/twld20> , 29.4.2017.
- [21] <http://www.meadinfo.org/2015/08/s355-steel-properties.html> , 27.6.2017.
- [22] <https://www.westyorkssteel.com/files/s355.pdf> , 27.6.2017
- [23] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022> 27.6.2017
- [24] <http://www.burwill.com/download/product/EN%2010025-2%202004.pdf> ,27.6.2017.

PRILOZI

I. CD-R disc